DER JUNGE FUNKER

Vom Detektor zum Superhet

Herausgegeben von Horst Kaczmarek TEIL II







Der junge Funker · Band 11

Vom Detektor zum Superhet
Teil II

Vom Detektor zum Superhet

Teil II

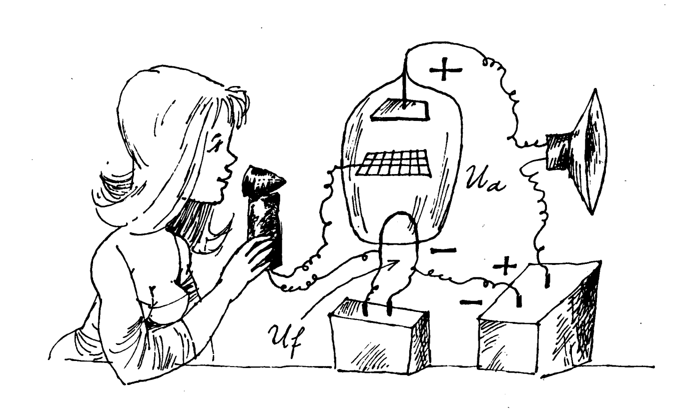
Herausgegeben
von Horst Kaczmarek



Deutscher Militärverlag

18. Aufbau der Elektronenröhre

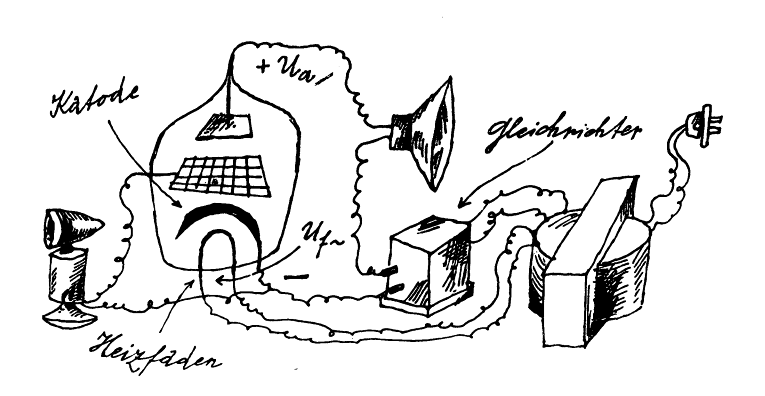
In ihrem Aufbau stimmt eine moderne Elektronenröhre kaum mit unseren bisherigen vereinfachten Darstellungen überein. Erstens ist die Katode senkrecht angeordnet, die Gitter sowie die Anode sind zylinderförmig (manchmal stark plattgedrückt) und schließen die Katode ein. Zweitens bilden die Gitter im wahrsten Sinne des Wortes keine Gitter, sondern Spiralen, wobei jede von ihnen auf 2 Metallstegen aufgewickelt ist. Alle Elektroden werden oben und unten durch kleine Glimmerplättchen zusammengehalten. Das ganze Röhrensystem wird gewöhnlich auf dem gläsernen Röhrenboden befestigt, aus dem die Anschlußstifte herausragen. Bei verschiedenen Röhrentypen ist am Röhrenkolben mit besonderem Leim ein Plastsockel mit Metallstiften angeklebt, in die die Elektrodenanschlüsse der Röhre eingelötet werden. Die Sockelstifte der Röhre ragen in die Röhrenfassung hinein und verbinden die Röhre mit den anderen Stromkreisen des Empfänger oder Verstärkers.
In modernen Röhren gibt es keinen gesonderten Röhrensockel mehr. Die Anschlußstifte ragen bei diesen Röhren unmittelbar aus dem Röhrenkolben heraus. Wir haben Röhren mit 7 Anschlüssen und solche mit 9 Anschlüssen. Für diese Röhren werden spezielle Röhrenfassungen mit 7 und 9 Kontakten hergestellt.
Bei batteriegeheizten Röhren (Batterieröhren sind *direkt geheizte Röhren*) bildet ein auf Isolatoren befestigter dünner Draht – der *Heizfaden* – die Katode. Durch diesen dünnen Heizfaden fließt der *Heizstrom* (Gleichstrom). Sollen diese Röhren vom Netz geheizt werden (*indirekt geheizte Röhren*), so dient Wechselstrom als Heizstrom. Daß der Wechselstrom



aber direkt durch die Katode fließt, ist teilweise unerwünscht, in vielen Fällen sogar unzulässig.
Der Grund dafür: Die von den Stromschwankungen abhängige Katodentemperatur verändert sich ebenfalls. Dabei werden unterschiedlich viel Elektronen aus der Katode emittiert, was sich auf den Anodenstrom der Röhre auswirkt. Schaltet man in den Anodenstromkreis einer derartigen Röhre einen Kopfhörer oder einen Lautsprecher, so hört man in beiden ständig ein *Brummen*. Dieses Brummen ist auf den durch die Katode fließenden Wechselstrom zurückzuführen.
Die Katode wird bei den meisten wechselstromgeheizten Röhren aus einem 1,5 bis 2 mm starken Röhrchen gefertigt, in dessen Mitte sich der Heizfaden, ein dünner Metalldraht oder eine Spirale, befindet. Die Katode ist vom Heizfaden isoliert. Ändert sich die Temperatur des Heizfadens infolge des Wechselstroms, so bleibt die Katodentemperatur trotzdem nahezu konstant, da die Katode eine große Wärmeträgheit aufweist. Der Heizfaden einer Röhre zählt nicht als gesonderte Elektrode, da er lediglich eine Hilfsfunktion erfüllt.
Die Katoden in fast allen Röhren werden aktiviert, d. h., man überzieht sie mit einer dünnen Schicht, die äußerlich mattgelb aussieht und aus speziellen Stoffen besteht, die das Austreten von Elektronen aus der Katode begünstigen. Nach

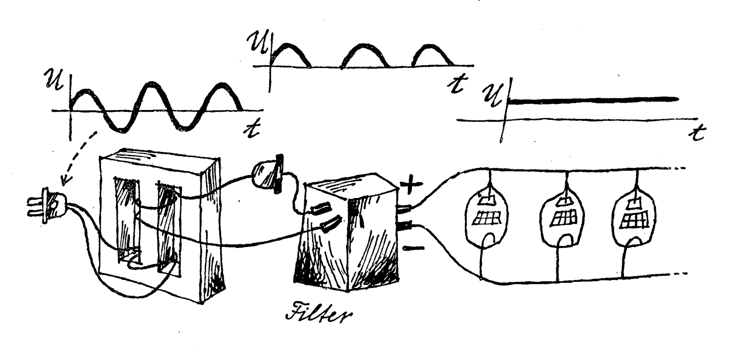
einer bestimmten Zeit (bei den meisten Röhren nach 2000 bis 3000 Stunden ununterbrochenem Betrieb) verliert die aktivierte Katode ihre Eigenschaften, Elektronen treten nur noch schwer aus der Katode aus; die Röhre wird praktisch unbrauchbar. Man sagt, die Röhre hat keine Emission mehr, sie ist „taub".

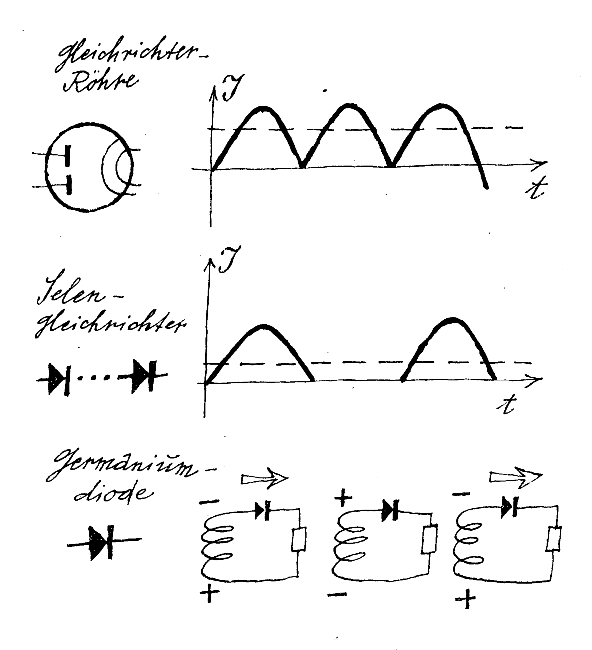
Für die Katodenheizung reicht gewöhnlich eine kleine Spannung aus, die Bruchteile eines Volt oder bis zu einigen Volt betragen kann. Am häufigsten werden Batterieröhren mit 1,4 V Heizspannung, indirekt geheizte Röhren mit 6,3 V Heizspannung verwendet. Wird die zulässige Heizspannung überschritten, so kann die aktivierte Schicht der Katode Schaden nehmen und der Heizfaden durchbrennen (bei Batterieröhren die Katode).



19. Die Stromversorgung der Elektronenröhre

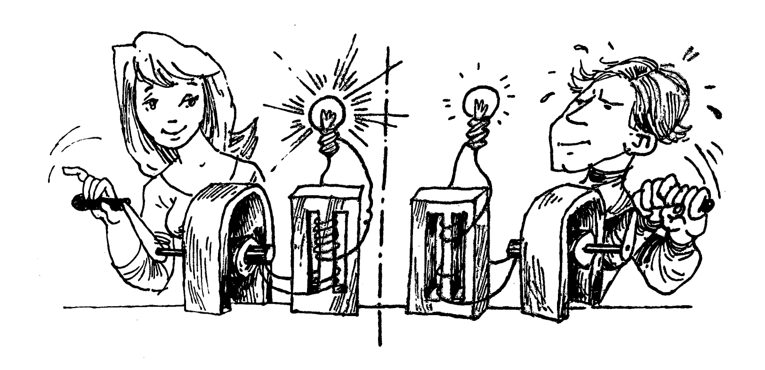
Für die Stromversorgung von Verstärkerröhren benötigen wir hauptsächlich 2 Stromquellen: eine *Niederspannungsquelle* für den Heizstromkreis und eine *Gleichspannungsquelle* mit einer hohen Spannung für die Anodenstromkreise. Die Schirmgitterspannung wird in der Regel von der Anodenspannungsquelle abgenommen.
In Batteriegeräten speist man die Röhren gewöhnlich aus 2 gesonderten Batterien – aus der *Heizbatterie* und der *Anodenbatterie.* Bei Geräten mit Netzanschluß benötigen wir für die Stromversorgung der Röhren einen Transformator und einen Gleichrichter.
Der Transformator setzt die Netzspannung bis auf den erforderlichen Wert für die Stromversorgung der Heizstromkreise herab (gewöhnlich 6,3 V). Der Gleichrichter formt die Netzwechselspannung in eine Gleichspannung zur Speisung der Anodenstromkreise um. Die Wechselspannung, die einem Gleichrichter zugeführt wird, kommt ebenfalls von einem





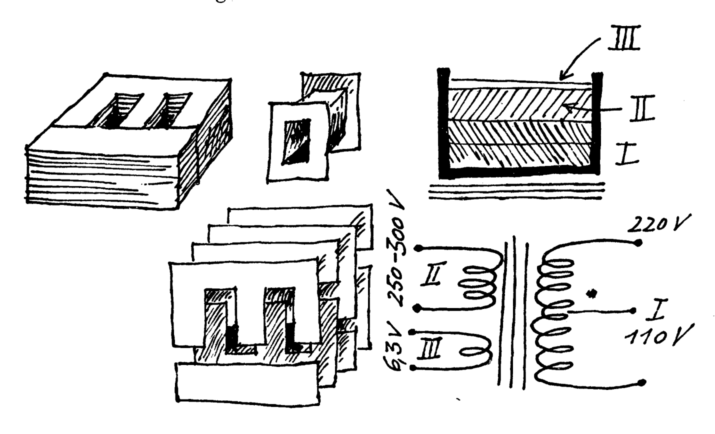
Transformator, so daß die Anodenspannung (meist 200 bis 250 V) bei der Stromversorgung von einem Wechselstromnetz mit 220 V fast unverändert bleibt. In einem Empfänger oder Verstärker sind häufig 2, manchmal sogar 3 Transformatoren unterschiedlicher Bestimmung vorhanden. Den Transformator, der die notwendigen Speisespannungen erzeugt, bezeichnet man als *Netztransformator*.

Wir wissen bereits: Werden 2 Spulen nebeneinander angeordnet und fließt durch eine der beiden Spulen Wechselstrom, dann entsteht um diese Spule ein wechselndes Magnetfeld. Dieses wechselnde Magnetfeld induziert in die zweite Spule einen Wechselstrom. Die Spannung, die an den Anschlüssen der zweiten Spule entsteht, hängt davon ab, wie stark die Kopplung beider Spulen durch den magnetischen Fluß ist und wie sich die Windungszahlen der 1. und der 2. Spule zueinander



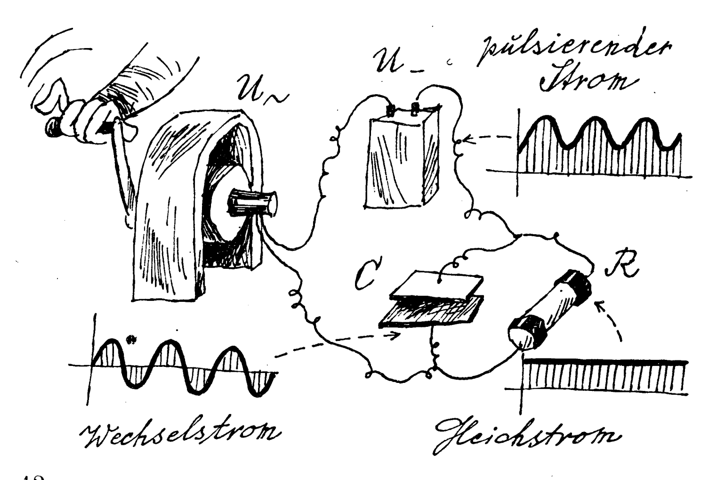
verhalten. Je mehr Windungen die 2. Spule enthält, um so größer ist die Spannung an den Anschlüssen. Durch mehrere „zweite" Spulen mit verschiedenen Windungszahlen können wir unterschiedliche Spannungen erzeugen.
Dieses Prinzip benutzt man bei Transformatoren, z. B. bei Netztransformatoren, zur Erzeugung der erforderlichen Spannungen: hohe Spannungen für die Stromversorgung der Anodenstromkreise, niedrige Spannungen für die Heizung der Röhren.
Entsprechend diesen Erfordernissen enthält der Netztransformator eine Netzwicklung, die vom Netz gespeist wird – die Anodenwicklung (200 bis 300 V) – und die Heizwicklung (6,3 V). Die meisten Netztransformatoren haben noch eine 2. Heizwicklung (4 V) für die gesonderte Stromversorgung der Gleichrichterröhre.
Um das Magnetfeld zu verstärken, das bei Transformatorspulen entsteht, bringt man die Spulen auf einem Eisenkern unter. Der Eisenkern ist lamelliert, d. h., er besteht aus einzelnen Blechen von 0,5 mm Stärke, die voneinander durch Papier oder Lack isoliert sind. Die Bleche können E-förmig und U-förmig sein.
In Bauanleitungen für Funkgeräte ist häufig der *Kernquerschnitt* S angegeben; das bedeutet Produkt aus Breite und Dicke des Eisenkerns.

Die Transformatorwicklungen werden meist aus Kupferlackdraht auf einen Spulenkörper aus Preßspan oder aus einem anderen Isoliermaterial gewickelt. Den Drahtdurchmesser bestimmt die Stromstärke, die durch die Wicklung fließt. Je größer sie ist, desto dicker muß der Wickeldraht sein. Beim Wickeln der Spulen wird eine Drahtlage über die andere gewickelt und dazwischen jeweils eine dünne Papierisolation gelegt.
Beim Wickeln eines Transformators ist besonders darauf zu achten, daß die äußeren Windungen einer Lage nicht nach unten abfallen und mit den Windungen anderer Lagen Kontakt bekommen. Eine fehlerhafte Drahtisolation führt zu Windungsschlüssen und zu übermäßiger Erwärmung der betreffenden Spule. Der Transformator kann durch diesen Fehler ausfallen.
Das untenstehende Bild zeigt den grundsätzlichen Aufbau eines Transformators.
Die Windungszahlen der einzelnen Transformatorwicklungen ergeben sich aus der Leistung, die sie liefern sollen, aus dem Kernquerschnitt und der Stahlsorte. Bei einem beliebigen Eisenkern ermittelt man das Windungszahlverhältnis der einzelnen Wicklungen daraus, um wievielmal die Spannung erhöht oder herabgesetzt werden soll.

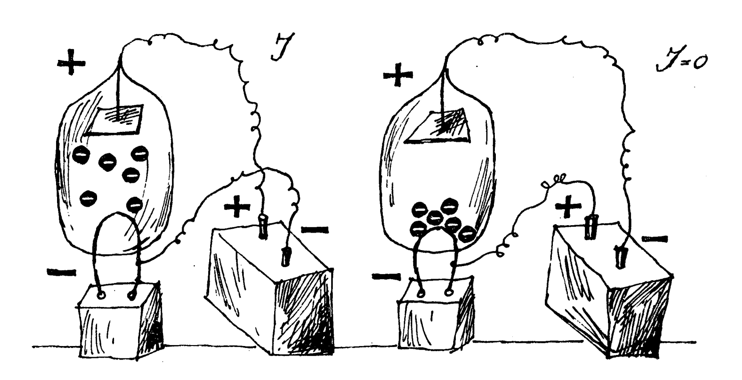


So muß zum Beispiel die Netzwicklung eines Transformators für 220 V etwa 2200 Windungen haben. Soll der Gleichrichter eine Spannung von 250 V erhalten, so muß die Anodenwicklung 2500 Wdg., die Heizwicklung für 6,3 V Heizspannung 63 Wdg. aufweisen. Bei der Berechnung eines Netztransformators ermitteln wir zuerst die Windungszahl je Volt (w_V). In unserem Beispiel ist $w_V = 10$. Anschließend multiplizieren wir diese Zahl mit der Spannung, die jede Wicklung liefern oder mit der sie versorgt werden soll. So erhalten wir die Windungszahlen der geforderten Wicklungen. Beim Umwickeln eines alten Transformators können wir die Windungszahl je Volt w_V dadurch bestimmen, daß wir die Spannung einer beliebigen Wicklung messen und dann die Windungen zählen. Manchmal erweist es sich als sehr zweckmäßig, eine besondere Wicklung für Prüfzwecke mit 15 bis 20 Windungen aus beliebigem Draht zu wickeln.

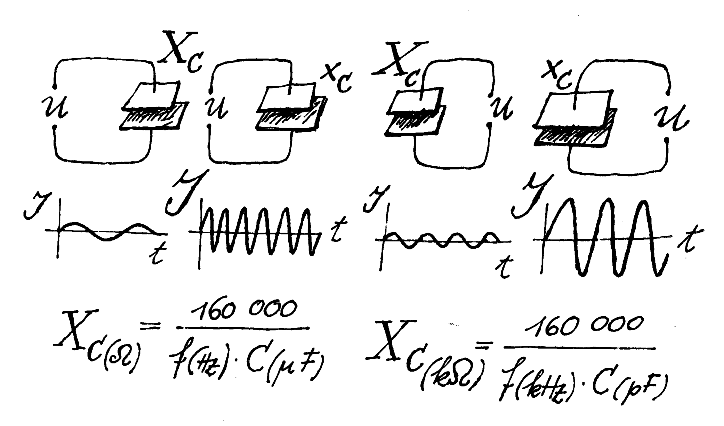
Damit wir die Anoden unserer Elektronenröhren vom Netz speisen können, müssen wir die Wechselspannung gleichrichten, d. h., sie in Gleichspannung umformen. Dieser Prozeß erfolgt in 2 Etappen. Zuerst wird die Wechselspannung

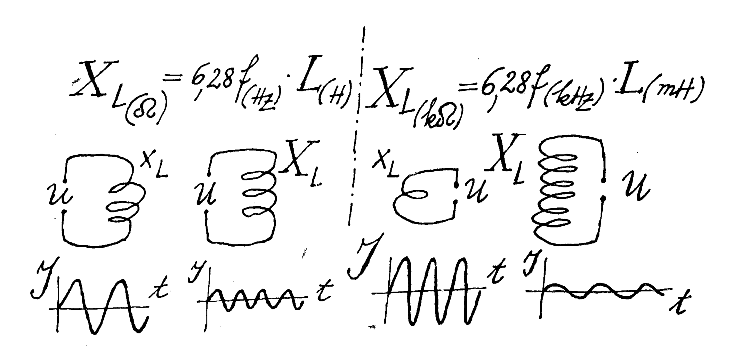


mit einer Diode (einem Ventil) in eine pulsierende Spannung umgewandelt. Anschließend glätten wir die pulsierende Spannung mit Hilfe von *Siebgliedern*, so daß eine Gleichspannung entsteht.
Als Ventil kann man Flächendioden, Selengleichrichter oder Dioden verwenden.
Eine Halbleiterdiode ist uns bereits bekannt, und wir wissen auch, *daß sie Strom nur in einer Richtung durchläßt und auf diese Weise Wechselstrom in pulsierenden Strom umwandelt.*
Der Selengleichrichter ist in seiner Art auch eine Halbleiterdiode, die Strom in einer Richtung sehr gut durchläßt, in der anderen Richtung dagegen sperrt. Bei der Elektronenröhre (Diode) beruht die Ventilwirkung darauf, daß Elektronen nur dann emittiert werden, wenn an der Anode eine positive Spannung (im Verhältnis zur Katode) liegt. Legen wir also an eine Diode zwischen Anode und Katode eine Wechselspannung, so fließt immer nur dann Strom durch die Röhre, wenn die positiven Halbwellen an der Anode wirken.
Bevor wir die Wirkungsweise eines Siebglieds betrachten, einige Worte über den pulsierenden Strom.
Pulsierender Strom kann in einem Stromkreis entstehen, in dem gleichzeitig 2 Generatoren arbeiten – der eine Generator liefert die Gleichspannung (z. B. eine Batterie), der andere



Generator eine Wechselspannung. Den Gesamtstrom in diesem Stromkreis kann man als Summe der Gleichstromkomponente und der Wechselstromkomponente betrachten, wobei jede Komponente von einem gesonderten Generator erzeugt wird. Die Gleichstrom- und die Wechselstromkomponente lassen sich in jedem pulsierenden Strom nachweisen, unabhängig, wie dieser Strom zustande gekommen ist.
Ein einfaches Siebglied kann aus einem Kondensator C und einem Widerstand R bestehen, die parallelgeschaltet sind.
Der Kondensator läßt ja bekanntlich Gleichstrom nicht durch, so daß die Gleichstromkomponente des pulsierenden Stromes nur durch den Widerstand R fließt.
Die Wechselstromkomponente kann sowohl durch den Widerstand als auch durch den Kondensator fließen. Unser Bestreben geht aber dahin, beide Komponenten voneinander zu trennen. Hierzu wählen wir die Kapazität des Kondensators so, daß der kapazitive Widerstand X_C wesentlich kleiner ist als der Widerstand R (s. Seite 12). In diesem Fall fließt die Wechselstromkomponente des pulsierenden Stromes praktisch nur durch den Kondensator. Bei der Auswahl des Kondensators ist es erforderlich, die Frequenz der Wechselstromkomponente zu beachten. Bei hohen Frequenzen



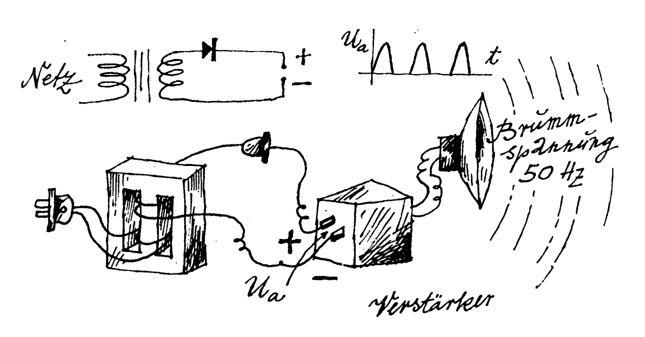


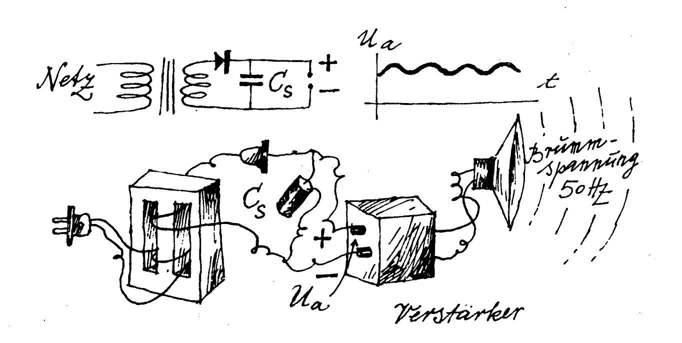
erreichen wir einen hohen Blindwiderstand X_C schon bei verhältnismäßig kleinen Kapazitäten (100 oder 1000 pF), während für niedrige Frequenzen kleine kapazitive Widerstände X_C, d. h. große Kondensatoren erforderlich sind (von 10 bis 100000 pF bzw. bis zu einigen hundert Mikrofarad). Um die Gleichstromkomponente und die Wechselstromkomponente des pulsierenden Stromes zu trennen, können wir auch eine Spule verwenden. Eine Spule läßt verhältnismäßig leicht Gleichstrom durch, setzt aber dem Wechselstrom einen großen Widerstand entgegen. Das erklärt sich daraus, daß sich bei Wechselstrom auch das Magnetfeld der Spule ständig umpolt. Dieses wechselnde Magnetfeld wirkt den Stromänderungen im Stromkreis immer entgegen. Den Widerstand, den die Spule dem Wechselstrom entgegensetzt, bezeichnet man als induktiven Widerstand und symbolisiert ihn durch die Buchstaben X_L.

$$X_L = 6{,}28\, f \cdot L;$$

X_L in Ω, f in Hz, L in H.
Je schneller der Strom in der Spule seine Richtung ändert, desto größer ist die Induktivität der Spule und desto größer wird die störende Wirkung des Magnetfelds, das den Strom im Stromkreis stark herabsetzt. Das bedeutet, der induktive Widerstand der Spule ist um so höher, je größer die Induktivi-

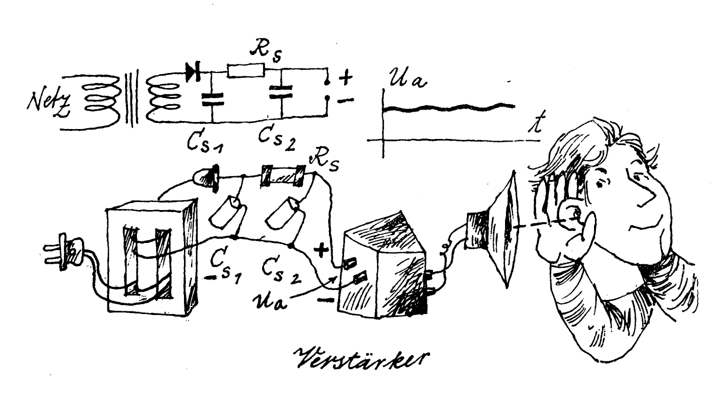
tät L und je höher die Wechselstromfrequenz f (je höher die Frequenz, desto schneller wechselt der Strom seine Richtung). Spulen in Siebgliedern verwendet man in Stromkreisen, bei denen es darauf ankommt, daß die Gleichstromkomponente leicht durchfließt und die Wechselstromkomponente gesperrt wird. Die Spulen, die man für diesen Zweck anfertigt, heißen *Drosseln*. Um den induktiven Widerstand X_L bei Drosseln besonders groß zu gestalten, wickelt man NF-Drosseln auf Eisenkerne. Die Drosselspulen enthalten bis zu einigen tausend Windungen.
Wenn wir jetzt ein Siebglied aus einer Drossel und einem Widerstand aufbauen und beide Bauelemente parallelschalten (X_L der Drossel ist bedeutend größer als der Widerstand R), so fließt die Wechselstromkomponente des pulsierenden Stromes hauptsächlich durch den Widerstand R, die Gleichstromkomponente aber durch die Drossel. Mit anderen Worten, ein Siebglied aus einer Spule L und einem Widerstand R erfüllt die gleiche Aufgabe wie ein RC-Siebglied.
Weil eine Drossel – besonders eine NF-Drossel – ein relativ teures Bauelement ist, setzt man dort, wo es möglich ist, Siebglieder aus Widerständen und Kondensatoren ein.
Siebglieder in Anodenspannungsgleichrichtern bestehen gewöhnlich aus 1 Widerstand R_S und 2 Elektrolytkondensatoren (C_S1 und C_S2) großer Kapazität (10 bis 40 μF). Bei dieser Gelegenheit sollte man sich gleich merken, daß Elektrolyt-





kondensatoren nur entsprechend ihrer Polarität angeschlossen werden dürfen (Aluminiumgehäuse mit Minus der Stromquelle und Pluspol mit der Lötfahne am Kondensator verbinden). Bei der Auswahl von Kondensatoren, besonders solchen für Hochspannungskreise, muß man auf die Betriebsspannung achten, denn bei jedem Kondensator sollte man eine bestimmte Spannungsreserve haben. Ist zum Beispiel auf dem Kondensator eine Betriebsspannung von 300 V angegeben, dann darf die tatsächliche Betriebsspannung in der Schaltung 200 bis 250 V nicht übersteigen.

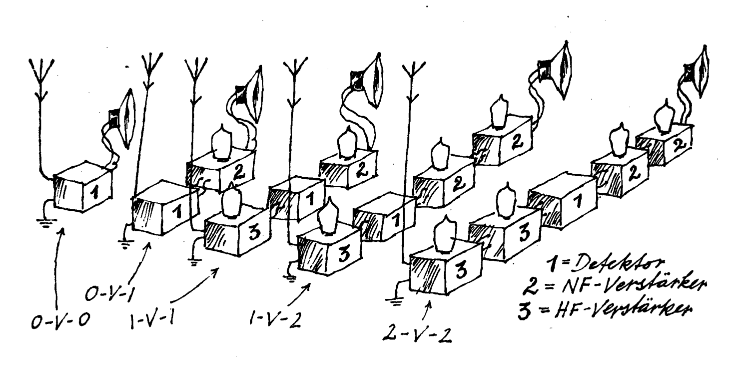
Der Hauptteil der Wechselstromkomponenten des pulsierenden Stromes fließt über den ersten Kondensator C_S1 hinter dem



Gleichrichter. Die endgültige Glättung der Spannung erfolgt durch den zweiten Kondensator C_s2. Für eine gute Glättung sollte der Widerstand R_s möglichst groß sein (3 bis 5 kΩ). In der Praxis ist R_s aber nicht größer als 1,5 bis 2 kΩ. Der Grund dafür liegt darin, daß die Gleichstromkomponente durch diesen Widerstand fließt und an ihm ein Teil der gleichgerichteten Spannung abfällt.
Je mehr Röhren von einem Gleichrichter gespeist werden, desto größer ist der Anodenstrom, und um so mehr wächst der Strom, der durch den Widerstand R_s fließt.
In Empfängern mit mehreren Röhren sowie bei Gleichrichtern, die sich durch eine besonders gute Glättung auszeichnen sollen, schaltet man an Stelle des Widerstands R_s eine NF-Drossel, die der Gleichstromkomponente des pulsierenden Stromes einen Widerstand von 300 bis 600 Ω entgegensetzt. Die Drossel bedeutet für die Wechselstromkomponente gleichzeitig einen großen Widerstand.

20. Verstärkung mit der Elektronenröhre

Mit Aufbau und Wirkungsweise einer Elektronenröhre haben wir uns in den vorangegangenen Abschnitten beschäftigt. Jetzt kommt es darauf an, mit einer Elektronenröhre die schwachen Signale zu verstärken, die unsere Antenne aufnimmt.
In Röhrenempfängern kann man sowohl das Hochfrequenzsignal, das von der Antenne kommt, als auch das Niederfrequenzsignal, das der Detektor liefert, verstärken. Es ist klar, daß HF-Verstärkerstufen vor den Detektor, NF-Verstärkerstufen dagegen hinter den Detektor geschaltet werden. Man teilt die Röhrenempfänger in 2 Gruppen, und zwar in die Gruppe der *Geradeausempfänger*, in denen das ankommende Signal lediglich verstärkt und gleichgerichtet wird, und in die zweite Gruppe, zu der die *Superhetempfänger* gehören. Bei ihnen wird das Signal nicht nur verstärkt und demoduliert, sondern es erfährt auch noch eine andere, sehr wichtige Umwandlung.



Die Empfänger, die unsere Rundfunkindustrie herstellt, sind ausschließlich Superhetempfänger. Sie zeichnen sich durch hohe Empfindlichkeit und Trennschärfe aus.
Wir beginnen mit einem einfachen Geradeausempfänger, da sich dieser Empfänger im Gegensatz zu einem Super leichter aufbauen und montieren läßt.
Der Geradeausempfänger gestattet uns, Ortssender lautstark zu empfangen und außerdem den NF-Verstärker für die Schallplattenwiedergabe auszunutzen. Anschließend bauen wir eine HF-Verstärkerstufe dazu. Mit diesem Gerät können wir dann schon eine große Zahl von Rundfunksendern im Lang- und Mittelwellenbereich empfangen.
In diesem Zusammenhang muß man sich merken, daß die Zahl der Röhren in einem Empfänger nicht immer gleich der Zahl der Verstärkerstufen ist. Es können kombinierte Röhren (Duotrioden, Trioden-Pentoden u. a.) vorhanden sein, die gleichzeitig in 2 Stufen arbeiten. Außerdem gibt es auch spezielle Schaltungen (Reflexschaltungen), die es gestatten, eine Röhre gleichzeitig als Hochfrequenz- und als Niederfrequenzverstärker arbeiten zu lassen.

Alles, was bisher über den Aufbau von Röhrenempfängern gesagt wurde, trifft auch auf Transistorempfänger zu.

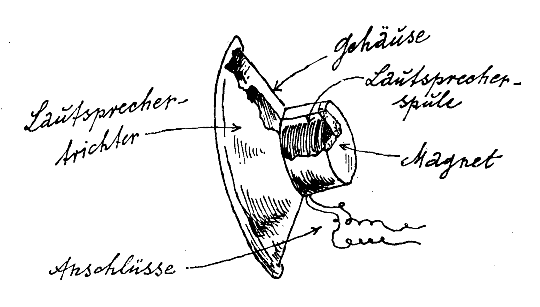
Geräte ohne HF-Verstärkerstufen bringen nur einen befriedigenden Ortssenderempfang, da bei der Demodulation schwacher Signale Verzerrungen entstehen. Der Aufbau eines leistungsstarken HF-Verstärkers ist jedoch relativ schwierig, deshalb führt man dem Detektor oft nur schwache HF-Signale (von Millionstel Watt) bei Spannungen von 0,3 bis 3 V zu. Etwa die gleiche Leistung und Spannung erhalten wir am Detektorausgang. Die weitere Signalverstärkung erfolgt dann durch NF-Verstärker.

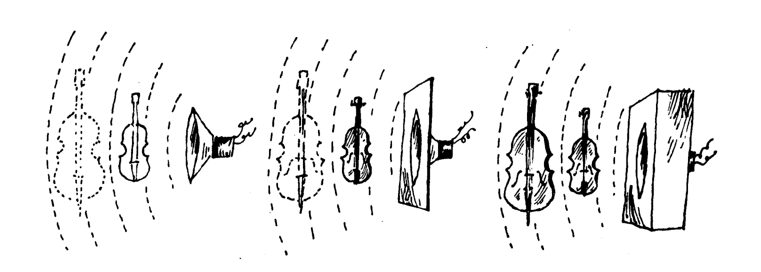
21. Der elektrodynamische Lautsprecher

Wie wir auch die elektrischen Niederfrequenzschwingungen verstärken mögen, unser Kopfhörer ist nicht in der Lage, die empfangenen Schallwellen lautstark wiederzugeben. Das erklärt sich aus dem besonderen Aufbau des Kopfhörers, in erster Linie aber daraus, daß die Membranen sehr klein sind und während der Schwingungen nur ein verhältnismäßig geringes Luftvolumen beeinflussen.

Eine lautstarke Wiedergabe erreichen wir mit einem Lautsprecher. In modernen Empfängern werden runde und elliptische *elektrodynamische Lautsprecher* mitPermanentmagneten eingesetzt. Das äußere Gehäuse eines Lautsprechers bildet der *Lautsprecherkorb*, an dem *Permanentmagnet* und *Lautsprechertrichter* befestigt sind.

Der Lautsprechertrichter wird aus einer Papiermasse gepreßt, die nach dem Pressen an Löschpapier erinnert. Der Lautsprechertrichter hat an der Spitze einen Papierzylinder, der die Lautsprecherspule aufnimmt. Diese enthält gewöhnlich 20 bis 50 Wdg. dünnen Kupferlackdrahts (0,1 bis 0,5 mm





Durchmesser), die teils in 1 Lage, teils in 2 Lagen gewickelt sind. Anfang und Ende der Lautsprecherspule werden über flexible Leitungen zu einem Lötösenstreifen geführt.
Der wichtigste Kennwert eines elektrodynamischen Lautsprechers ist der Gleichstromwiderstand R_{sp} der Lautsprecherspule. Er beträgt bei den meisten Lautsprechern 2 bis 15 Ω.
Die Lautsprecherspule ragt in das starke Magnetfeld des Permanentmagneten hinein. Wir wissen bereits, daß sich um eine stromdurchflossene Spule ein Magnetfeld bildet, das um so stärker wird, je größer der durchfließende Strom ist. Von der Stromrichtung hängt die Magnetpollage der Spule ab. Bei einer bestimmten Stromrichtung wird die Spule vom Permanentmagneten angezogen, bei der entgegengesetzten Stromrichtung abgestoßen.
Fließt Wechselstrom durch die Lautsprecherspule, so schwingt sie und folgt allen Richtungs- sowie Stärkeänderungen des Wechselstroms. Zusammen mit der Lautsprecherspule bewegt sich der Lautsprechertrichter und versetzt die ihn umgebende Luft in Schwingungen. Auf diese Weise entstehen Schallschwingungen, die frequenzmäßig und in ihrer Lautstärke dem Strom in der Lautsprecherspule entsprechen.
Je größer der Strom, der durch die Lautsprecherspule fließt, desto kräftiger schwingt der Lautsprechertrichter, um so lauter ist der Ton, den er aussendet. Selbstverständlich kann man die Stromstärke in der Lautsprecherspule nicht unendlich

steigern. Ein höherer Strom als der für den jeweiligen Lautsprechertyp zulässige überlastet den Lautsprecher und führt zu entsprechenden Tonverzerrungen. Eine starke Überlastung kann den Lautsprecher sogar völlig zerstören. Entweder brennt die Lautsprecherspule durch, oder bei starken Stromstößen birst der Lautsprechertrichter.
Jeder Lautsprechertyp ist für eine bestimmte Maximalleistung ausgelegt, die man der Lautsprecherspule zuführen kann, ohne daß starke Tonverzerrungen entstehen. Diese Leistung wird in Watt angegeben und ist auf dem Lautsprecher vermerkt.
Nicht die ganze dem Lautsprecher zugeführte Energie wird in Schallwellen umgesetzt. Ein Teil dieser Energie geht durch die Erwärmung der Lautsprecherspule und durch mechanische Verluste im Lautsprechertrichter verloren. Deshalb ist die Schalleistung etwas kleiner als die zugeführte elektrische Leistung. Die Leistung, die der NF-Verstärker an die Lautsprecherspule liefert, bezeichnet man als *Ausgangsleistung* des NF-Verstärkers. Bei zwei Verstärkern gleicher Ausgangsleistung erfolgt die Umwandlung der elektrischen Energie in Schallenergie bedeutend wirkungsvoller, wenn der Lautsprecher auf einer speziellen Holzplatte oder Sperrholzplatte montiert ist. Wir bezeichnen diese Holzplatte zweckmäßig als *Resonanzwand.*
Die Frage, welcher Lautsprecher im Empfänger oder im Verstärker einzusetzen und welche Leistung ihm zuzuführen ist, hängt ganz von den Forderungen ab, die man an das Gerät stellt. So arbeitet z. B. ein Kopfhörer bei Leistungen, die geringer sind als ein Milliwatt (1 mW = 0,001 W) sehr gut. Für einen Taschenempfänger mit Lautsprecher kann man die Ausgangsleistung auf 20 bis 50 mW beschränken. In einem kleinen Raum arbeitet ein stationärer Rundfunkempfänger mit einer Ausgangsleistung von 200 mW (0,2 W) mit ausreichender Lautstärke.
Einfache, industriell gefertigte Empfänger haben eine Ausgangsleistung von 0,5 bis 1 W, bessere Empfänger 3 bis 8 W.

Bei Verstärkern für die Innenraumbeschallung, z. B. bei Kinoanlagen, beträgt die Ausgangsleistung einige hundert Watt. Die NF-Verstärker in den Studios bei Ausstellungen und Messen haben Gesamtleistungen von 20 kW (1 kW = 1000 W).

Eine große Verstärkung zu garantieren, ist eine der Hauptforderungen, die wir an einen Niederfrequenzverstärker stellen.

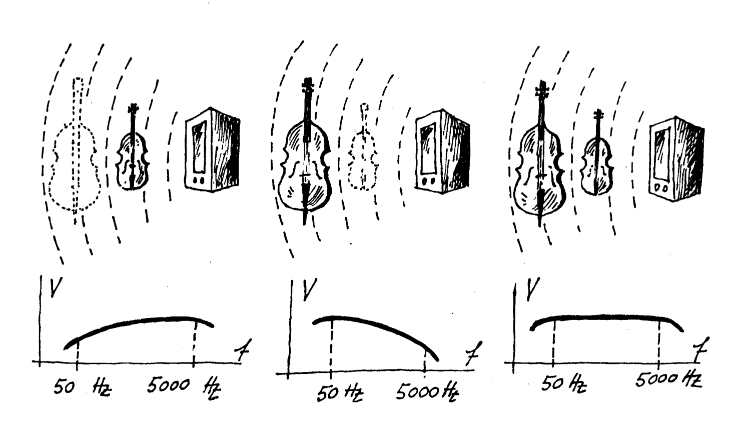
Die übrigen ebenfalls wichtigen Forderungen an einen NF-Verstärker kann man kurz zusammenfassen: *Der Niederfrequenzverstärker muß auf jeden Fall verzerrungsfrei arbeiten!*

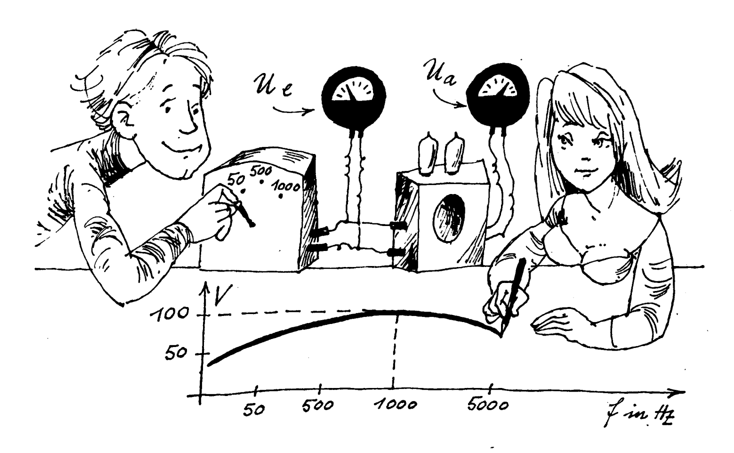
22. Verstärken ohne Verzerrung

Am häufigsten begegnen uns in der Rundfunktechnik 2 Arten von Verzerrungen – *Frequenzverzerrungen* und *Amplitudenverzerrungen*.

Frequenzverzerrungen entstehen, wenn der Verstärker aus irgendeinem Grund die elektrischen Schwingungen verschiedener Frequenzen nicht gleichmäßig verstärkt (oder der Lautsprecher diese Schwingungen nicht gleichmäßig wiedergibt). Singen z. B. 2 Sänger – 1 Baß und 1 Tenor – vor einem Mikrofon, und der NF-Verstärker gibt die unteren Schallfrequenzen sehr schlecht wieder, so gewinnt der Rundfunkhörer den Eindruck, daß der Baß etwas leiser singt als sein Partner, der Tenor. Besonders stark machen sich Frequenzverzerrungen bemerkbar, wenn sinfonische oder leichte Musik, von einem Orchester gespielt, übertragen wird.

Jeder NF-Verstärker (wie allgemein sämtliche Verstärker) enthält Bauelemente, Spulen und Kapazitäten, die die



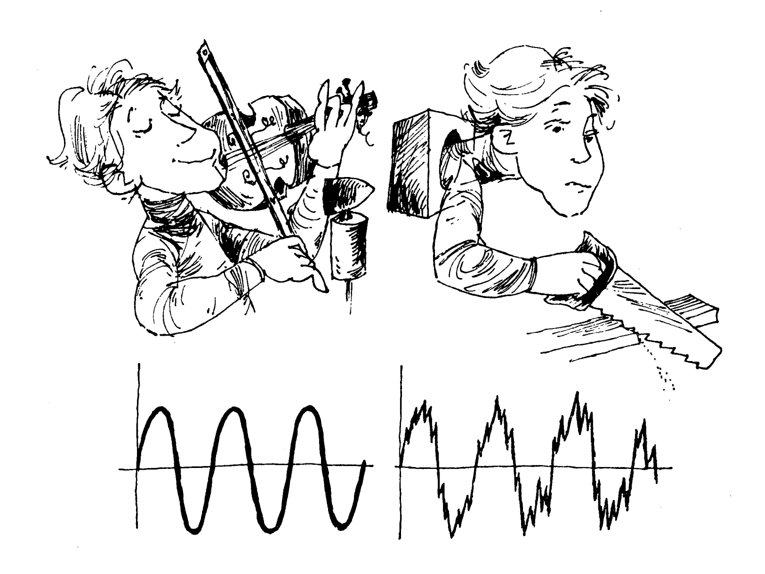


Ursache für Frequenzverzerrungen sein können. Das hängt damit zusammen, daß der Blindwiderstand (X_L und X_C) dieser Bauelemente bei Wechselstrom frequenzabhängig ist. Fließt das Signal also durch Verstärkerstromkreise, in denen Spulen und Kondensatoren vorhanden sind, so kann eine starke Dämpfung der niedrigen Frequenzen (z. B. durch Größerwerden von X_C und Verringern von f) oder der hohen Frequenzen (z. B. durch Wachsen von X_L bei der Steigerung der Frequenz f) eintreten.

Um Frequenzverzerrungen zu vermeiden, müssen wir Bauelemente im Verstärker verwenden, die es gestatten, alle Frequenzen von 30 Hz bis 15 kHz gleichmäßig zu verstärken. Einen gleichmäßigen Verstärkungsgrad in diesem breiten Frequenzbereich zu erreichen, ist jedoch äußerst schwierig, so daß man in einfachen Empfängern den unteren Frequenzbereich auf 50 bis 150 Hz, den oberen Frequenzbereich auf 6 bis 7 kHz begrenzt.

Zur Beurteilung von Frequenzverzerrungen eines Verstärkers dient meist der Frequenzgang, der angibt, welchen Wert der Verstärkungsfaktor v bei verschiedenen Frequenzen hat. Der Verstärkungsfaktor v ist das Verhältnis der Ausgangsspannung U_a zur Eingangsspannung U_e am Verstärker.

In der Regel wird der Verstärkungsfaktor an den Enden des Frequenzgangs (im Bereich der hohen und der niedrigen Frequenzen) kleiner. Durch den Vergleich der Verstärkung dieser oder jener Frequenz mit der Verstärkung einer bestimmten mittleren Frequenz (gewöhnlich ist die mittlere Frequenz mit 1000 Hz festgelegt) lassen sich Frequenzverzerrungen auch zahlenmäßig erfassen. Wird z. B. ein Signal mit der Frequenz von 1000 Hz 100 fach und ein Signal mit der Frequenz 50 Hz nur 50fach verstärkt, so sagt man, daß der Frequenzgang bei 50 Hz *eingesattelt* ist und der Verstärkungsfaktor auf dieser Frequenz nur die Hälfte beträgt. Es ist üblich, eine Einsattelung oder einen Höcker im Frequenzgang in *Neper* (Np) auszudrücken.
Außer dem Verstärker kann auch der Lautsprecher Frequenzverzerrungen verursachen. So verzerren etwa Lautsprecher mit kleinem Lautsprechertrichter sehr stark niedrige Frequenzen, während große Lautsprecher hohe Frequenzen schlecht wiedergeben. Damit eine gleichmäßige Wiedergabe des ganzen Frequenzbereichs gewährleistet ist, baut man in guten Rundfunkgeräten mehrere Lautsprecher mit verschiedenen Kennwerten ein.
Will man Frequenzverzerrungen allseitig einschätzen, so wird nicht der Frequenzgang der Ausgangsspannung U_a, sondern der Schalldruck, den der Lautsprecher erzeugt, aufgenommen. Für den jungen Bastler sind derartige Messungen relativ schwierig, so daß wir uns bei der Einschätzung unseres selbstgebauten Empfängers erst einmal auf unser Ohr verlassen müssen.
Hört man sehr aufmerksam besonders Musiksendungen ab, so kann man leicht den Abfall der unteren Frequenzen feststellen (der Ton wird „trocken", d. h., Instrumente, wie der Kontrabaß, das Violoncello und besonders die Pauke, sind schlecht herauszuhören). Einen Abfall der oberen Frequenzen erkennt man an der verzerrten Wiedergabe von Geigen- und Flötentönen.
Am zweckmäßigsten ist es, den Verstärker erst dann zu über-



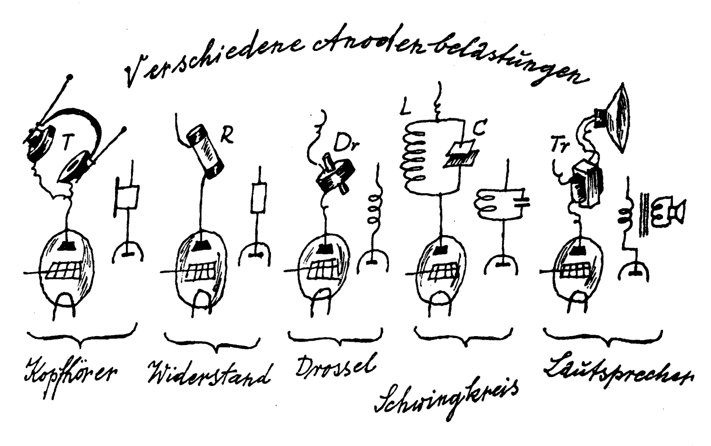
prüfen, wenn man den Lautsprecher auf einer Holzplatte befestigt hat und sich das ganze Gerät in einem Gehäuse befindet. Werden diese Hinweise außer acht gelassen, so erscheinen die unteren Frequenzen besonders stark verzerrt. Amplitudenverzerrungen treten in einem bestimmten Umfang in allen Teilen des Rundfunkempfängers auf. Das sind praktisch Verzerrungen der Signalform. Mit anderen Worten, *die Kennlinie der Ausgangsspannung entspricht nicht der Kennlinie der Eingangsspannung*. So kann z. B. die Ausgangsspannung infolge Amplitudenverzerrungen unverändert bleiben, obwohl sich gleichzeitig die Eingangsspannung veränderte (etwa zunahm). Infolge einer Formverzerrung der Signalkennlinie entspricht der Ton, den der Lautsprecher wiedergibt, nicht dem Ton, der in das Mikrofon gelangte.
Die Hauptquellen von Amplitudenverzerrungen in NF-Verstärkern sind die Röhren sowie Transformatoren mit Eisenkern. In diesen Bauelementen verzerrt sich die Signalform, da z. B. durch ein großes Eingangssignal auf dem Steuergitter

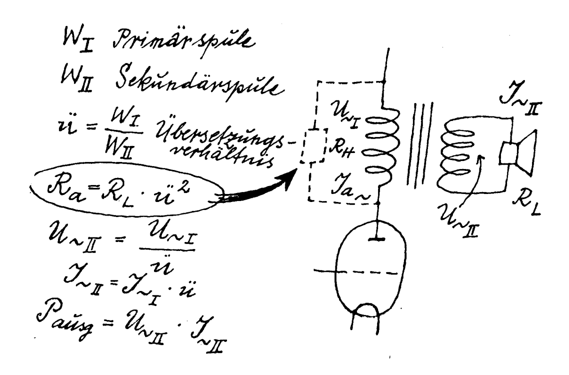
die Röhre gesperrt wird (d. h., kein Anodenstrom fließt) oder auch, weil der Eisenkern des Transformators gesättigt, d. h. bis zur Grenze magnetisiert ist und weitere Stromsteigerungen in der Primärspule nicht zu einem stärkeren Magnetfeld führen.
Durch entsprechende Spannungen auf den Gittern der Röhren und durch die richtige Berechnung der Transformatoren lassen sich Amplitudenverzerrungen in NF-Verstärkern stark herabsetzen.
Neben dem Frequenzgang gibt man für die Einschätzung einer beliebigen Lautsprecheranlage den Koeffizienten der Amplitudenverzerrungen, *den Klirrfaktor*, an. Der Klirrfaktor zeigt an, wieviel Prozent der Leistung des Schallnutzsignals die Leistung störender Geräusche (Rauschen und Klirrtöne) ausmacht.
Angenommen, vor dem Mikrofon steht ein Geiger, der langsam über eine Saite der Geige streicht. Das Mikrofon nimmt Schallwellen mit einer Frequenz von 500 Hz auf, die, nachdem sie in unseren Empfänger gelangten, mit einer Leistung von 1 W wiedergegeben werden. Wir nehmen außerdem an, daß auf Grund von Amplitudenverzerrungen im Sender, im Empfänger und in anderen Bauelementen der Lautsprecher außer dem Ton von 500 Hz noch andere Töne wiedergibt, die nicht gesendet wurden und deren Leistungsanteil 0,1 W ausmacht. In diesem Fall beträgt der Klirrfaktor des genannten Übertragungswegs vom Mikrofon bis zum Lautsprecher 10 %.
Geringe Amplitudenverzerrungen (1 bis 3 %) nimmt unser Ohr nicht wahr. Verzerrungen von 8 bis 12 % dagegen setzen die Tonqualität stark herab. Bei Verzerrungen von 15 bis 25 % wird die Übertragung so schlecht, daß sie störend wirkt.
In jedem einzelnen Bauelement unseres Empfängers entstehen nur sehr kleine Verzerrungen. Als Rundfunkhörer nehmen wir aber nicht die einzelnen Verzerrungen, sondern die Summe aller Verzerrungen auf. Das zwingt uns, den Klirrfaktor in allen Bauelementen, im Sender, im Detektor, im NF-Verstärker usw., so gering wie irgend möglich zu halten. Bei

Lautsprechern betragen die Amplitudenverzerrungen 2 bis 3 %, bei guten Verstärkern 0,5 bis 1,5 %. Bei einiger Sorgfalt können wir in einem einfachen NF-Verstärker einen Klirrfaktor von 3 bis 5 % erreichen; das bedeutet, es besteht eine Anlage mit durchaus brauchbarer Tonqualität, die bereits höheren Ansprüchen genügt.

23. Die Verstärkerstufe

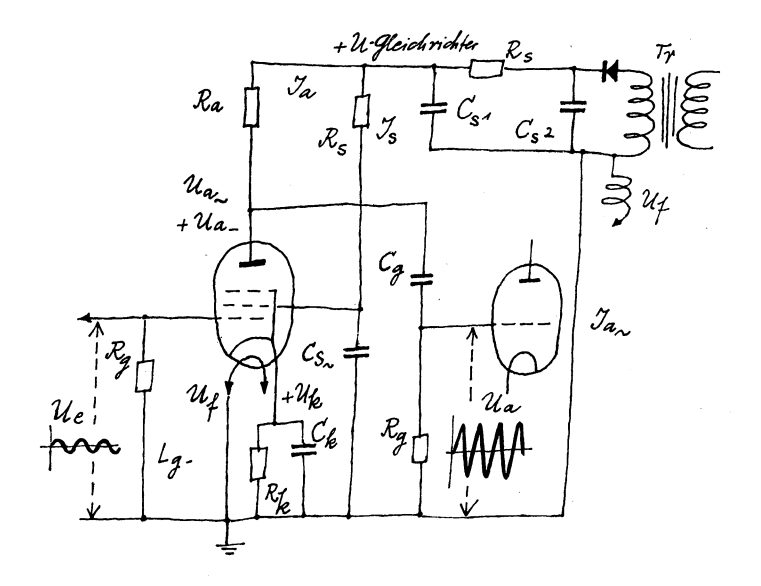
Außer der Elektronenröhre und den Spannungsquellen, aus denen die Röhre gespeist wird, ist die Anodenbelastung, der *Arbeitswiderstand*, eines der wichtigsten Bauelemente in einer Verstärkerstufe. Am Arbeitswiderstand entsteht die leistungsfähige Kopie des zu verstärkenden Signals.
Als Arbeitswiderstand können Kopfhörer, Lautsprecher, gewöhnliche Widerstände, Schwingkreise, Drosseln und andere Bauelemente dienen. Der Arbeitswiderstand wird in der Regel in den Anodenkreis der Röhre eingeschaltet.
Betrachten wir jetzt kurz, wie eine Verstärkerstufe mit einem Widerstand als Anodenbelastung arbeitet.
Solange die Steuergitterspannung unverändert bleibt, fließt im Anodenkreis der Röhre Gleichstrom (der *Anodenruhestrom* I_a). Wenn wir jetzt dem Steuergitter das zu verstärkende





Signal zuführen, entsteht im Anodenkreis ein pulsierender Strom. Im Rhythmus des am Steuergitter wirkenden Signals ändert sich der Anodenstrom der Röhre. Er behält dabei seine Richtung bei und fließt nach wie vor von der Katode zur Anode.

Der pulsierende Anodenstrom enthält eine Gleichstromkomponente I_{a-} und eine Wechselstromkomponente $I_{a\sim}$. Beide Komponenten, das wissen wir bereits, kann man nach Bedarf mit Hilfe von Siebgliedern voneinander trennen. Bei der Verstärkung spielt die Wechselstromkomponente des Anodenstroms $I_{a\sim}$, die durch das zu verstärkende Signal entsteht, die Hauptrolle. Die Wechselstromkomponente $I_{a\sim}$, die durch den Anodenbelastungswiderstand fließt, erzeugt an ihr die leistungsfähige Kopie des zu verstärkenden Signals. Im Bild auf Seite 33 ist der Verlauf der Wechselstromkomponente des Anodenstroms $I_{a\sim}$ eingezeichnet. Durch die Röhre und den Anodenwiderstand fließen Wechselstromkomponente $I_{a\sim}$ und Gleichstromkomponente I_{a-} zusammen. Anschließend trennen sich die Wege beider Komponenten. Die Wechselstromkomponente $I_{a\sim}$ kehrt über den Siebkondensator C_s im Gleichrichter zum Anodenwiderstand zurück. Die Gleichstromkomponente I_{a-} dagegen nimmt ihren Weg durch die Anodenwicklung des Transformators, durch die Diode und durch den Widerstand R_s im Siebglied.



Bei Batteriespeisung des Anodenstromkreises fließen beide Komponenten (I_{a-} und $I_{a\sim}$) durch die Batterie, so daß es zweckmäßig ist, die Batterie mit einem Kondensator großer Kapazität vor der Wechselstromkomponente zu schützen (Batterie durch Kondensator shunten!). Die Wechselstromkomponente fließt dann über den kleineren Widerstand des Shuntkondensators.

Die Wechselstromkomponente $I_{a\sim}$ erzeugt am Anodenwiderstand eine Spannung:

$$U_{a\sim} = I_{a\sim} \cdot R_a.$$

Hieraus ergibt sich eine bestimmte Leistung

$$P_{a\sim} = U_{a\sim} \cdot I_{a\sim};$$

$P_{a\sim}$ — Wechselstromleistung, $U_{a\sim}$ — Wechselspannungskomponente, $I_{a\sim}$ — Wechselstromkomponente.

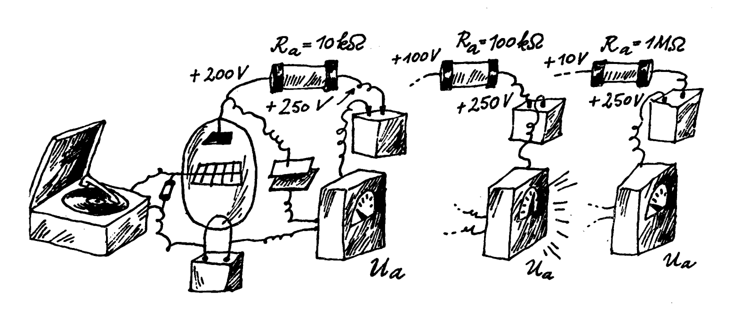
Je größer die Anodenbelastung R_a ist, desto größer wird die Wechselspannung $U_{a\sim}$ und um so größer auch die Leistung, die am Arbeitswiderstand R_a abfällt. Mit anderen Worten: *Je größer der Arbeitswiderstand R_a, desto größer die Stufenverstärkung.*

Nun läßt sich die Anodenbelastung nicht unendlich steigern, da sonst starke Signalverzerrungen entstehen und die Wechselspannung $U_{a\sim}$ sehr klein wird. Einer der Gründe dafür ist z. B., daß die Gleichstromkomponente I_{a-} des Anodenstroms, wenn sie durch die Anodenbelastung R_a fließt, an ihr ebenfalls einen Spannungsabfall erzeugt. Je größer I_a und R_a, desto größer ist auch der Teil der Gleichrichterspannung, die am Belastungswiderstand verlorengeht und folglich die Anodenspannung (die zwischen der Anode und der Katode anliegt) stark herabsetzt.

Bei einer sehr starken Anodenbelastung kann die Anodenspannung unter Umständen so klein werden, daß die Stufe überhaupt nicht mehr verstärkt.

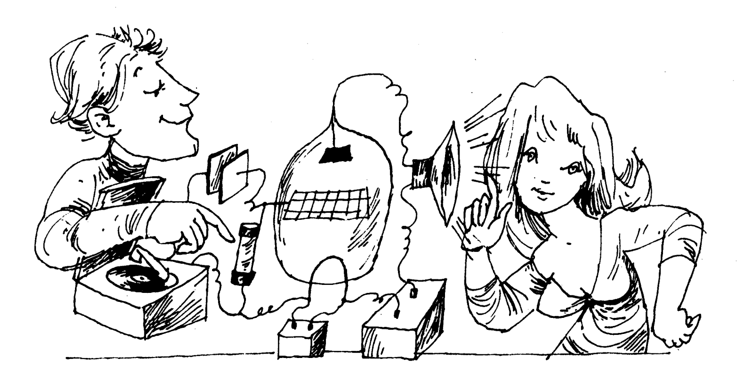
Die Spannung, die zwischen Anode und Katode wirksam ist, wird nicht nur durch die maximal zulässige Anodenbelastung R_a bestimmt. Diese Spannung setzt sich vielmehr aus 2 Komponenten zusammen; aus der Gleichspannung vom Gleichrichter und aus der Wechselspannung, die der Anodenwechselstrom an der Anodenbelastung erzeugt.

Zu bestimmten Zeiten kann nun die Polarität der Wechselspannung so sein, daß sie der Anodengleichspannung entgegen-

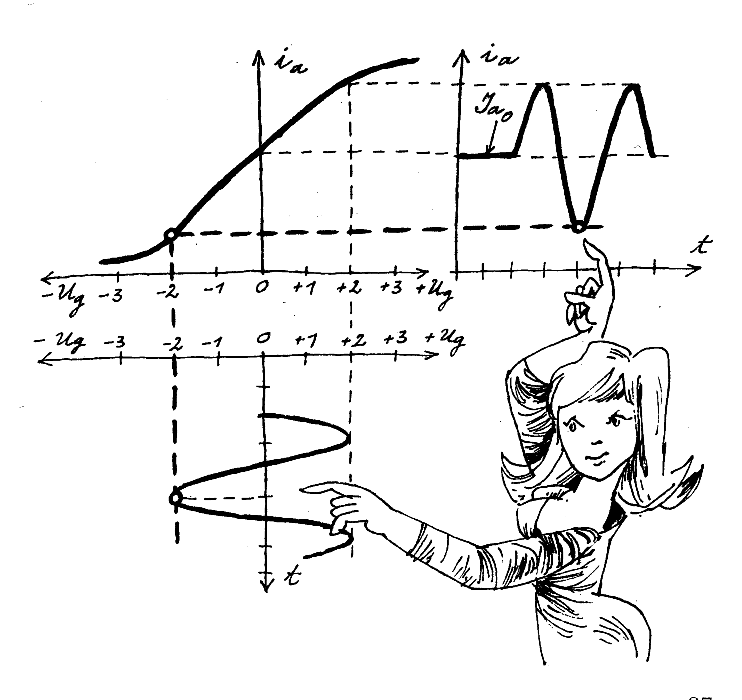


wirkt und sich die Gesamtspannung an der Anode stark verringert. In diesen Augenblicken zieht die Anode nur wenig Elektronen an, so daß auch der Anodenstrom bedeutend zurückgeht und auf die Änderungen der Steuergitterspannung nicht mehr anspricht. Das Resultat dieser Erscheinung ist, daß der Anodenstrom nicht mehr der Anodenstrom-Gitterspannungskennlinie entspricht und praktisch Amplitudenverzerrungen entstehen.
Um all diesen genannten und unerwünschten Erscheinungen zu begegnen, soll die Anodenspannung in jedem Fall nicht kleiner werden als 10 bis 30 % der Spannung der Anodenspannungsquelle (abhängig von der jeweiligen Röhre). Der Arbeitswiderstand ist aus diesem Grund so zu bemessen, daß die Wechselspannungsamplitude an der Anodenbelastung 70 bis 90 % der Anodengleichspannung nicht übersteigt.
Für jeden Röhrentyp gibt es einen bestimmten optimalen Wert für die Anodenbelastung $R_{a\ opt}$. Dieser Wert ist entweder bei den Röhrendaten mit angegeben, oder man kann ihn an Hand der Röhrenkennlinie ermitteln. Als Orientierung sollte man sich merken, daß die optimale Anodenbelastung für Trioden 2- bis 3mal größer, für Pentoden 2- bis 3mal kleiner sein muß als der innere Widerstand R_i der Röhre (der *innere Widerstand* R_i gehört zu den Kennwerten einer Röhre). Wollen wir die richtige Anodenbelastung durch Probieren finden, so beginnen wir mit kleinen Widerständen und erhöhen R_a so weit, wie die Ausgangsspannung ansteigt oder keine Verzerrungen eintreten.
Sehr häufig dienen auch Drosseln als Anodenbelastung. In diesem Fall wird die Wechselspannung $U_{a\sim}$ an der Belastung hauptsächlich von dem induktiven Widerstand X_L der Drossel bestimmt. Der induktive Widerstand der Drossel läßt sich leicht durch einen Eisenkern vergrößern.
Gleichzeitig setzt die Drossel dem Gleichstrom einen relativ kleinen Widerstand entgegen, so daß auch der Gleichspannungsabfall entsprechend kleinbleibt. Aus diesem Grund wirkt in einer Verstärkerstufe mit einer Drossel als Anoden-

belastung fast die ganze Gleichrichterspannung an der Anode der Verstärkerröhre. Die gleiche Eigenschaft zeichnet auch eine Verstärkerstufe aus, die als Arbeitswiderstand im Anodenkreis einen Transformator enthält.
Trotz der genannten Vorteile verwendet man Drosseln aber nur selten als Anodenbelastung in NF-Verstärkern. Der Grund dafür ist in den starken Frequenzverzerrungen zu suchen, die eine Drossel verursacht. Der Belastungswiderstand X_L ist sehr stark frequenzabhängig, folglich auch die Stufenverstärkung.
Als Anodenbelastung in HF-Verstärkern dienen meistens Schwingkreise, die auf das zu verstärkende Signal abgestimmt sind.
Ein wichtiges Bauelement jeder Verstärkerstufe ist der *Gitterableitwiderstand* R_g. Ein Widerstand im Steuergitterkreis wird erforderlich, weil ein Teil der aus der Katode emittierten Elektronen auf das Steuergitter gelangt. Sie erzeugen auf dem Steuergitter eine große negative Ladung, die den Elektronenstrom von der Katode zur Anode behindert (die Röhre wird gesperrt).
Um diese Erscheinung einzudämmen, schaltet man zwischen das Steuergitter und die Katode den Widerstand R_g. Über diesen Widerstand können die Elektronen, die sich auf dem



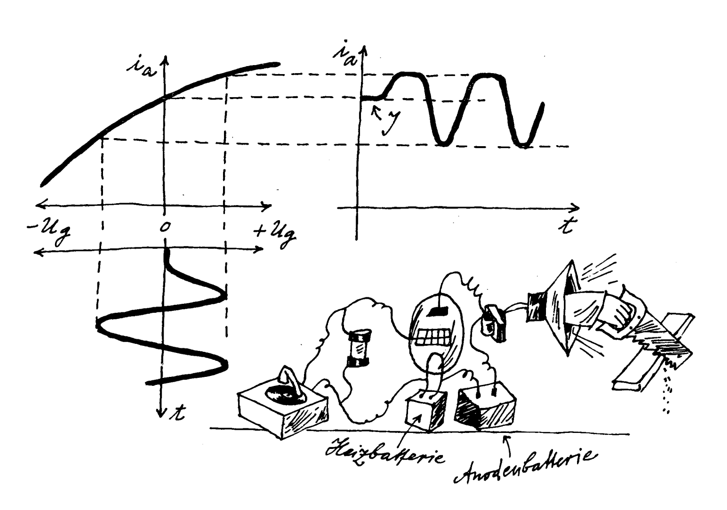
Steuergitter angesammelt haben, wieder zur Katode zurückkehren. Der *Gitterableitwiderstand*, wie er sehr häufig bezeichnet wird, ist sehr groß bemessen (von einigen hundert Kiloohm bis zu einigen Megaohm). Bei kleinen Widerstandswerten würde der Gitterableitwiderstand die Spannungsquelle des zu verstärkenden Signals (den Detektorkreis, einen Schwingkreis usw.) übermäßig shunten. In den Fällen, wo zwischen Steuergitter und Katode ein Bauelement eingeschaltet ist, das Gleichstrom durchläßt (Kohlekörnermikrofon, Transformatorwicklung usw.), brauchen wir keinen zusätzlichen Gitterableitwiderstand einzuschalten.
Die Wirkungsweise einer Verstärkerstufe untersuchen wir am zweckmäßigsten an der dynamischen Kennlinie der Verstärkerröhre. Diese unterscheidet sich von den vorher betrachteten



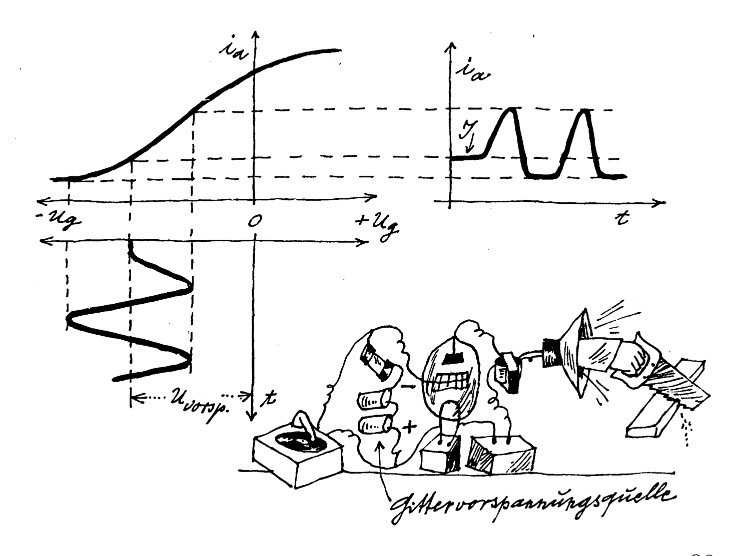
Röhrenkennlinien dadurch, daß man die Anodenspannungsänderungen der Röhre, die durch die Signale am Steuergitter hervorgerufen werden, bei belastetem Anodenstromkreis untersucht. Wenn man nun die Kennlinie der Gitterspannungsänderungen mit der dynamischen Kennlinie der Röhre vereinigt, so entsteht eine Kennlinie, die uns die Anodenstromänderungen je Zeiteinheit anzeigt.

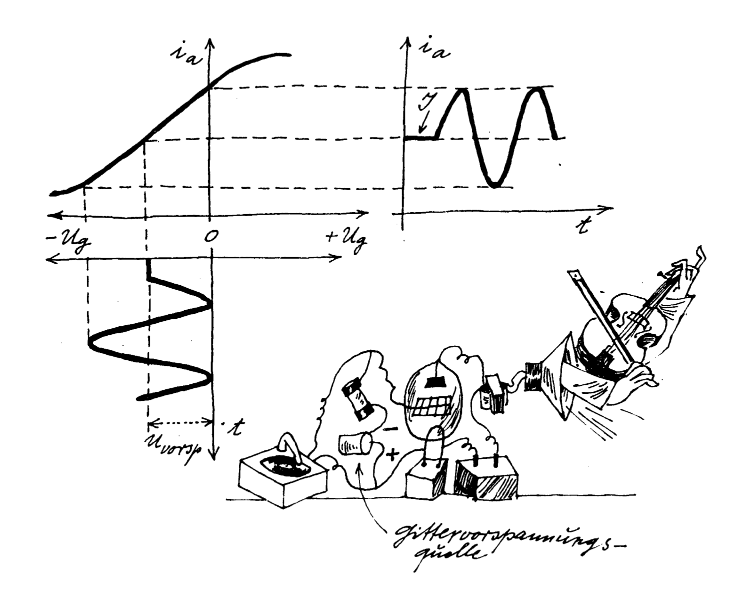
Um die grafische Darstellung des Anodenstroms zu vereinfachen, haben wir eine kleine Ungenauigkeit zugelassen: Wir ließen außer acht, daß bei positiven Gitterspannungen ein Gitterstrom fließt und dadurch nicht alle Elektronen, die die Katode verlassen, zur Anode gelangen. Der Gitterstrom beeinflußt den Anodenstrom, d. h., er ruft Amplitudenverzerrungen hervor.

Damit diese Verzerrungen, die der Gitterstrom verursacht, vermieden werden, ist immer darauf zu achten, daß niemals eine positive Spannung am Steuergitter wirkt. Das läßt sich relativ einfach erreichen. Wir geben auf das Steuergitter zusammen mit dem zu verstärkenden Signal eine negative Gleichspannung – die sogenannte *negative Gittervorspannung*.



Die dem Steuergitter zugeführte Spannung wird sich genauso wie früher im Rhythmus des zugeführten Signals verändern, nur bleibt sie jetzt immer im negativen Bereich.
Die Höhe der negativen Gittervorspannung ist sehr sorgfältig zu bestimmen. Wählt man sie zu groß, dann kann die Röhre zu bestimmten Zeiten gesperrt werden, was Anodenstromverzerrungen nach sich zieht. Deshalb wird sie so bemessen, daß der Anodenruhestrom der Mitte des geraden Abschnitts der Röhrenkennlinie entspricht (*Arbeitspunkt* der Röhre).
Es gibt mehrere Verfahren, um auf dem Steuergitter eine negative Gittervorspannung zu erreichen. Eine Methode besteht darin, das man in Reihe zu dem Gitterableitwiderstand eine zusätzliche Gittervorspannungsquelle (Batterie) schaltet. Eine andere Methode, die sehr verbreitet ist, nutzt den Spannungsabfall an einem speziell dafür in den Katodenkreis geschalteten Widerstand aus. Die Gleichstromkomponente des Anodenstroms, die durch den Katodenwiderstand R_k fließt, erzeugt an ihm eine Spannung, deren positives Potential an der Katode, deren negatives Potential an Masse oder am

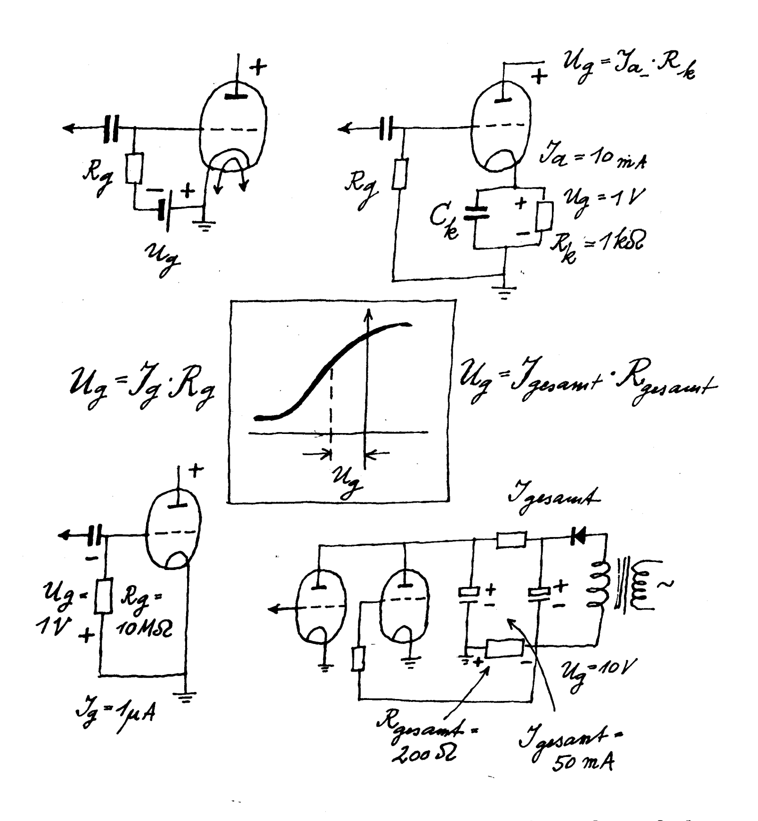




allgemeinen Minus liegt. Mit der Masse verbinden wir aber – in der Schaltung den unteren Anschluß – den Gitterableitwiderstand R_g, so daß die Spannung vom Katodenwiderstand R_k praktisch zwischen Steuergitter und Katode anliegt. Den erforderlichen Vorspannungswert bestimmt der Katodenwiderstand R_k. Je größer R_k, desto größer auch die negative Vorspannung am Steuergitter.

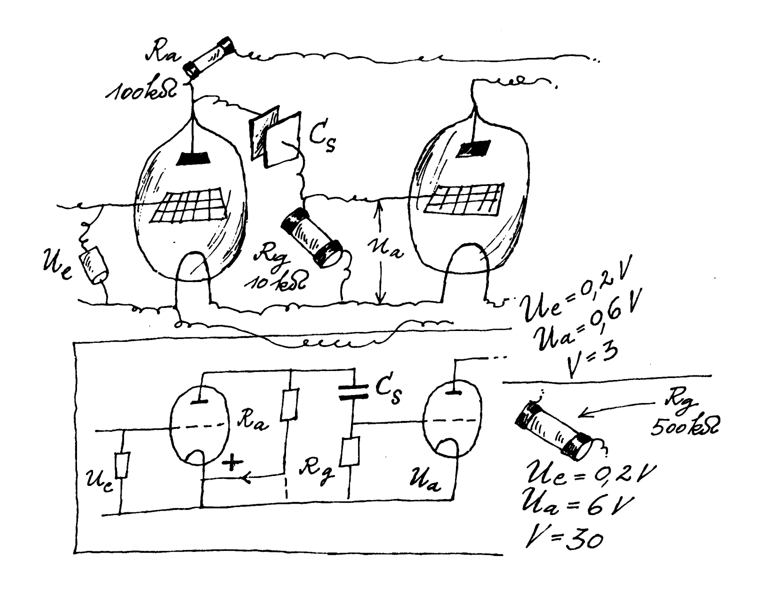
Um zu verhindern, daß auch die Wechselstromkomponente am Katodenwiderstand R_k wirksam wird, schalten wir parallel zu R_k einen Kondensator C_k .Die Kapazität dieses Kondensators wird so bemessen, daß der kapazitive Widerstand X_C auch auf den niedrigsten zu verstärkenden Frequenzen 10- bis 15mal kleiner ist als R_k.

Häufig benutzt man auch den Gitterableitwiderstand R_g dazu, eine negative Gittervorspannung zu erzeugen. Das wird dadurch möglich, da ja immer ein sehr kleiner Gitterstrom von einigen Mikroampere vorhanden ist. Wenn wir

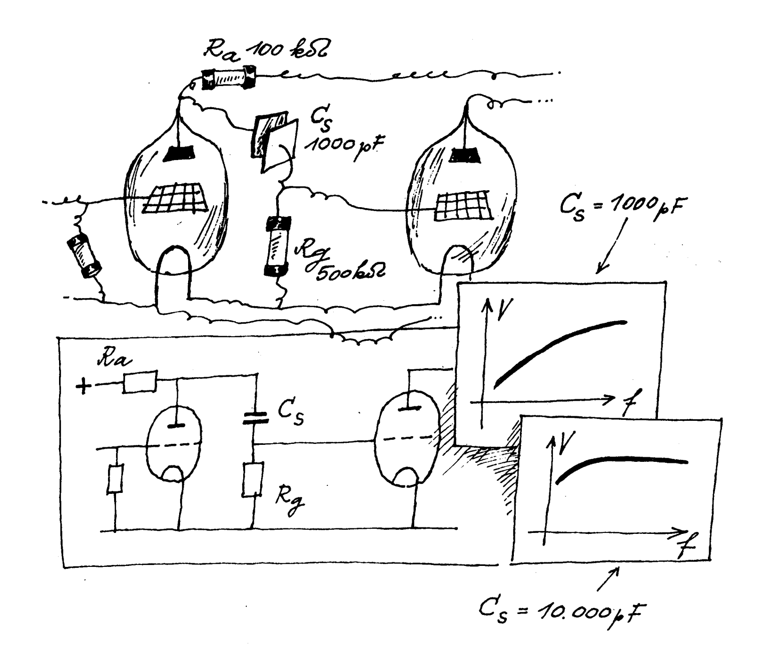


also den Gitterableitwiderstand R_g ausreichend groß bemessen (10 bis 20 MΩ), so entsteht an ihm auch ein Spannungsabfall von einigen Volt, dessen negatives Potential direkt am Steuergitter liegt.

In den meisten industriell gefertigten Rundfunkempfängern beschreitet man noch einen anderen Weg, um die verschiedenen negativen Gittervorspannungen zu erzeugen: In die sogenannte Minusleitung des Gleichrichters wird ein Widerstand eingeschaltet. Der Gesamtanodenstrom aller Röhren, der durch den Widerstand fließt, erzeugt an ihm einen bestimmten Spannungsabfall. Werden nun die Katoden der



Röhren und der Plusanschluß vom Gleichrichter an Masse gelegt, so ergibt sich am Steuergitter der Röhre eine im Verhältnis zur Katode negative Spannung. Mehrere in Reihe geschaltete Widerstände liefern unterschiedliche negative Spannungen, die als Gittervorspannung für die einzelnen Röhren geeignet sind.
Bei Schirmgitterröhren (Tetroden, Pentoden, Heptoden) ist nicht nur die Anode, sondern auch das Schirmgitter mit positiver Spannung zu versorgen. Die Schirmgitterspannung beträgt in der Regel 50 bis 70 % der Anodenspannung. Nur bei einigen Röhren müssen beide Spannungen gleich sein. Man entnimmt sie gewöhnlich ebenfalls der Anodenspannungsquelle. Die Schirmgitterspannung wird dabei mit Spannungsteilern oder Vorwiderständen auf den erforderlichen Wert herabgesetzt. Bei einem Vorwiderstand fließt der *Schirmgitterstrom* I_S durch ihn, d. h. der Strom, den die Elektronen bilden, die auf das Schirmgitter gelangen. Als Folge davon

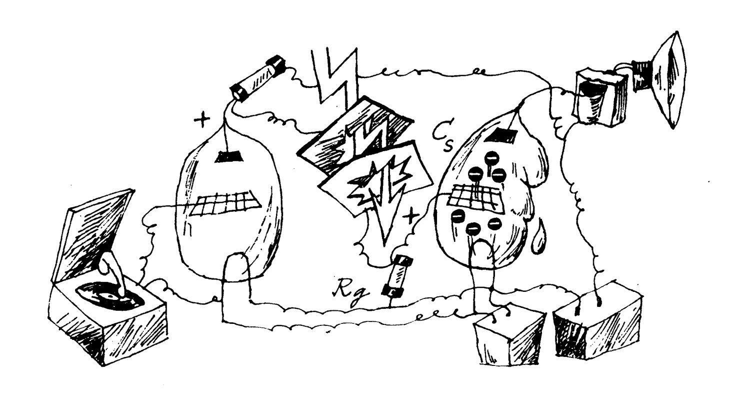


geht am Vorwiderstand ein Teil der Gleichrichterspannung verloren.

Wir beobachten das gleiche wie am Arbeitswiderstand im Anodenkreis: *Je größer Schirmgitterstrom und Vorwiderstand, desto geringer die Schirmgitterspannung.*

Wir dürfen niemals vergessen, daß das Schirmgitter für den Wechselstrom mit der Katode verbunden sein muß. Diese Verbindung stellen wir mit einem *Trennkondensator* C_S her, dessen Kapazität so bemessen wird, daß der kapazitive Widerstand X_C auch bei den niedrigsten zu verstärkenden Frequenzen sehr klein ist – bedeutend kleiner als der Vorwiderstand.

Alle Bauelemente, die wir bis jetzt besprochen haben, den Arbeitswiderstand, die Gittervorspannungsquelle, den Gitterableitwiderstand sowie die Röhren bzw. Transistoren, die die



Verstärkung der ankommenden Signale grundsätzlich erst ermöglichen, sind für alle HF-Verstärker und NF-Verstärker erforderlich, unabhängig von ihrer Leistung. Jetzt wollen wir untersuchen, wie die besprochenen Bauelemente in einem 2stufigen Niederfrequenzverstärker zusammenwirken.

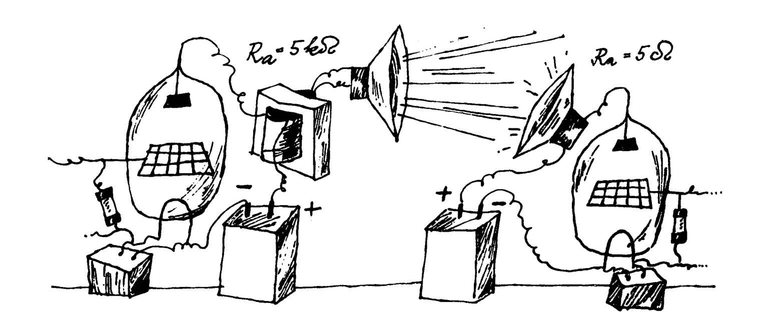
24. Leistungsverstärker und Spannungsverstärker

Um eine verhältnismäßig große Leistung zu erreichen, die zum Betrieb eines Lautsprechers erforderlich ist, verwendet man in der letzten NF-Verstärkerstufe (man nennt sie auch *Leistungsverstärkerstufe*) spezielle Röhren, die als Ausgangsröhren bezeichnet werden.
In Rundfunkempfängern kommen als Ausgangsröhren am häufigsten Pentoden und Strahltetroden, seltener dagegen Trioden vor. Die wesentlichste Besonderheit der Ausgangsröhren besteht darin, daß sie einen großen Anodenstrom aufweisen (40 bis 70 mA). Der Anodenstrom anderer Röhren (die man in Empfängern und Verstärkern verwendet) ist gewöhnlich nicht größer als 5 bis 10 mA.
Der optimale Arbeitswiderstand R_S für Ausgangsröhren wird in den Röhrentaschenbüchern angegeben und liegt meist zwischen 3 und 10 kΩ. Der Widerstand R_L der Lautsprecherspule beträgt aber gleichzeitig nur wenige Ohm. Aus diesem Grund würden wir, wenn der Lautsprecher unmittelbar als Arbeitswiderstand in den Anodenkreis geschaltet ist, nur eine Ausgangsleistung von einigen millionstel Watt erreichen.
Damit man den erforderlichen Belastungswiderstand bei dem verhältnismäßig kleinen Widerstand der Lautsprecherspule erhält, bedient man sich eines Hilfsmittels, des *Ausgangstransformators*. Er wird in den Anodenkreis der Ausgangsröhre geschaltet und verbindet auf diese Weise den Anodenkreis mit der Lautsprecherspule.
Die Wechselstromkomponente des Anodenstroms, die durch die Primärwicklung des Ausgangstransformators fließt, induziert in die Sekundärwicklung einen Strom, der die Lautsprecherspule in Schwingung versetzt.

Bei Betrieb verbraucht der Lautsprecher eine bestimmte Menge elektrischer Energie, die aus dem Anodenkreis der Röhre entnommen wird. Verallgemeinert können wir den Lautsprecher mit dem Ausgangstransformator als einen unmittelbar in den Anodenkreis geschalteten gewöhnlichen Widerstand R_a' betrachten, den wir Belastungswiderstand nennen. Der Widerstand R_a' bildet sozusagen die Anodenbelastung und bestimmt die Ausgangsleistung der Röhre.
Der Ausgangstransformator transformiert immer herunter, d. h., *die Windungszahl der Sekundärspule ist stets kleiner als die Windungszahl der Primärspule.* Aus diesem Grund ergibt sich auch zwangsläufig in der Sekundärspule im Verhältnis zur Primärspule eine kleinere Wechselspannung. Der Wechselstrom in der Sekundärspule dagegen ist im Verhältnis zur Primärspule weitaus größer.
Noch stärker unterscheidet sich der wirkliche Widerstand der Belastung R_a' vom Widerstand R_L der Lautsprecherspule. Das wird völlig klar, wenn wir folgendes betrachten: Die Primärspannung liegt wesentlich höher als die Sekundärspannung, der Strom dagegen, der durch die Primärspule fließt, ist sehr klein. Das resultiert daraus, daß es sich bei dem eingeführten Widerstand R_a' um einen mehrfach größeren handelt als bei dem Widerstand R_L der Lautsprecherspule.
Kennen wir das Übersetzungsverhältnis ü des Ausgangstransformators, so läßt sich R_a' leicht nach der folgenden Formel berechnen.

$$R_a' = R_L \cdot ü^2.$$

Durch die entsprechende Wahl des Übersetzungsverhältnisses ü kann man einen Belastungswiderstand R_a' von einigen Kiloohm bei einem Widerstand der Lautsprecherspule von wenigen Ohm erreichen.
Beträgt z. B. die Wechselstromkomponente des Anodenstroms $I_{a\sim} = 20$ mA und das Übersetzungsverhältnis ü = 50, so fließt durch die Lautsprecherspule ein Strom von 1 A.
Führen wir dem Lautsprecher eine Leistung von 1 W zu, so



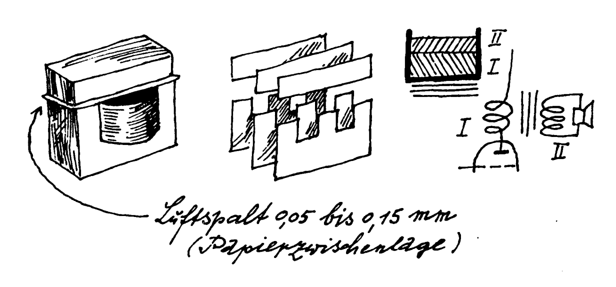
haben wir an der Lautsprecherspule eine Spannung von 1 V, an der Primärspule des Ausgangstransformators 50 V. Nach dem Ohmschen Gesetz errechnen wir, daß

$$R_L = 1\ \Omega \text{ und } R_a{}' = 2{,}5\ k\Omega$$

betragen.

Die Wechselspannungs- oder Wechselstromwerte werden in der Regel als *Effektivwerte* angegeben. Uns ist der Begriff Amplitude bereits bekannt — die Amplitude ist der maximale Spannungs- oder Stromwert.

Der Effektivwert der Spannung oder des Stromes dagegen, gibt uns an, welche mittlere Arbeit der elektrische Strom während einer ganzen Periode zu leisten vermag. Es läßt sich leicht einsehen, daß der Effektivwert der Spannung oder des Stromes weniger beträgt als der Amplitudenwert. Die effek-

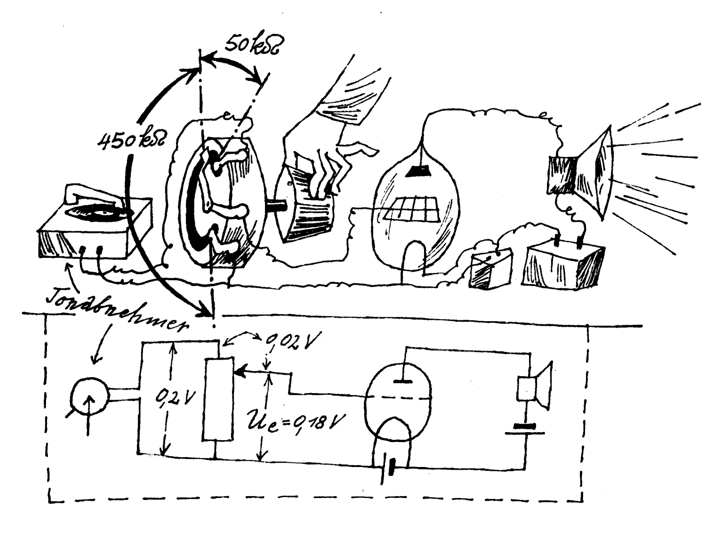


tive Spannung in unserem Wechselstromnetz ist um 1,414mal kleiner als der Amplitudenwert. Mit anderen Worten: Bei einer effektiven Spannung von 220 V erreicht der Amplitudenwert ≈ 308 V. Die Angaben betreffs Netzspannung, Spannungen in den Transformatorwicklungen und auf Meßgeräteskalen beziehen sich stets auf den *effektiven Wert.*

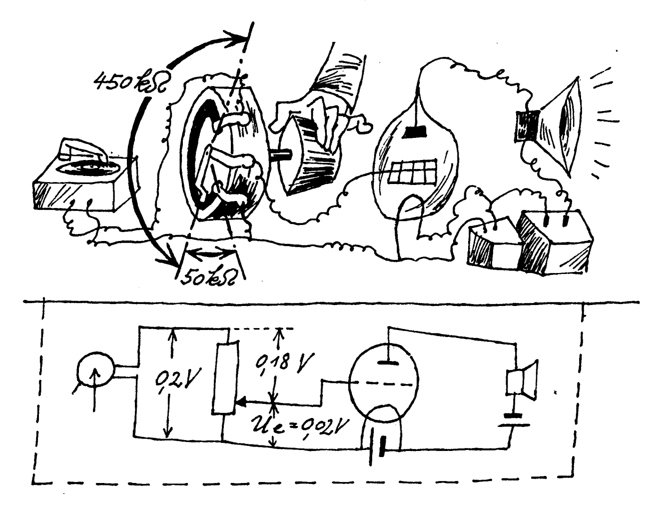
Für den normalen Betrieb eines Leistungsverstärkers benötigt man an der Ausgangsröhre eine Steuerspannung von einigen Volt (in der Regel 3 bis 15 V). Die Spannung, die die Quelle des verstärkten Signals hat, ist aber meist bedeutend kleiner.

Die Ausgangsspannung an einem Tonabnehmer beträgt nur Bruchteile eines Volt, Mikrofone erzeugen eine Spannung von einigen Millivolt, und die NF-Spannung am Detektorausgang in einfachen Röhrenempfängern übersteigt ebenfalls kaum 1 V.

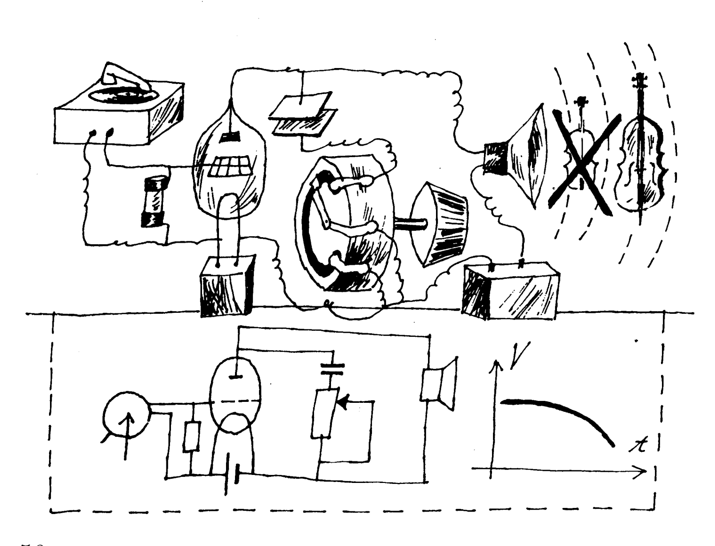
Stellt man das in Rechnung, so muß unser NF-Verstärker noch eine weitere Stufe erhalten (manchmal auch 2 bis 3). Diese Stufen haben die Aufgabe, die Signalspannung 10- bis 50 mal

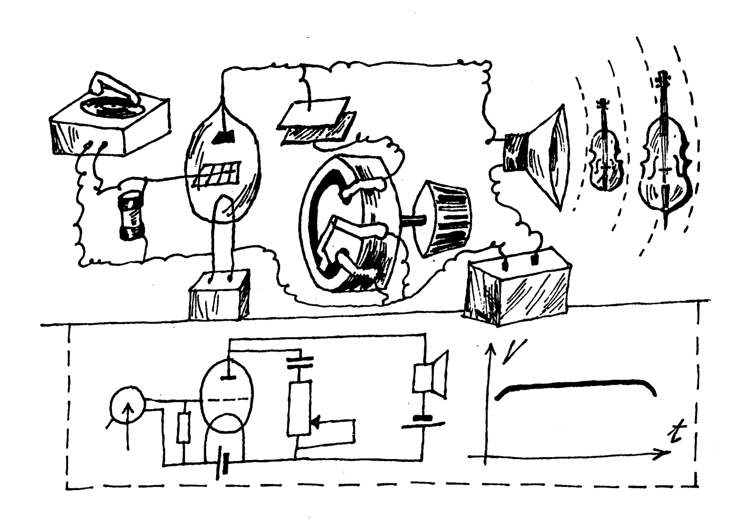


zu vergrößern. Die Anodenbelastung in einem Spannungsverstärker besteht in der Regel aus einem ohmschen Widerstand. In diesem Fall können wir die Wechselspannung von der Anode der Röhre eines Spannungsverstärkers nicht direkt an das Steuergitter der Ausgangsröhre leiten, da an der Anode außer der Wechselspannung auch noch eine Gleichspannung vorhanden ist. Das verstärkte Signal wird also über einen Kopplungskondensator C_s der Ausgangsstufe zugeführt. Ein Kondensator läßt ja bekanntlich Gleichstrom nicht durch!
Der Kondensator C_s bildet zusammen mit dem Gitterableitwiderstand R_g der Ausgangsstufe einen *Spannungsteiler* (s. Bild auf S. 42), der an den Anodenwiderstand R_a angeschlossen ist (der obere Anschluß von R_a wird über den Siebkondensator C_s des Gleichrichters mit Masse verbunden. Der Teil der verstärkten Spannung, der am Widerstand R_g abfällt, gelangt an das Steuergitter des Leistungsverstärkers. Praktisch ist das die Ausgangsspannung der Stufe.
Der Gesamtwiderstand des Spannungsteilers R_g/C_{kopp} muß ausreichend groß sein, da er sonst die Anodenbelastung der



vorangehenden Stufe zu stark shuntet. In der Regel ist R_g etwas größer bemessen als R_a. Die Kapazität des Koppelkondensators C_{kopp} muß ebenfalls ausreichend groß gewählt werden, damit er auch bei den niedrigsten Frequenzen keinen allzu großen Widerstand aufweist (sonst Verzerrung des Frequenzgangs). Außerdem ist dieser Kondensator für eine hohe Betriebsspannung (200 bis 300 V) auszulegen. Beachten wir das nicht, dann kann der Kondensator durchschlagen (Kurzschluß zwischen den Platten). Als Folge davon entsteht auf dem Steuergitter der Ausgangsröhre eine hohe positive Spannung; es fließt ein starker Gitterstrom, und der Anodenstrom steigt auch unzulässig an. Dadurch kann die Röhre beschädigt werden und ausfallen.
In den Steuergitterkreis eines Spannungsverstärkers ist gewöhnlich der Lautstärkeregler eingeschaltet. Außerdem sind Verstärker mit Klangfarbereglern ausgestattet, so daß man die Möglichkeit hat, den Frequenzgang individuell, entsprechend der jeweiligen Sendung, einzustellen.





Ein einfacher Klangfarberegler (s. Bild auf S. 50), mit dem man die Verstärkung der hohen Frequenzen herabsetzen kann, besteht aus einem Potentiometer und einem Kondensator. Der Kondensator soll einen möglichst kleinen kapazitiven Widerstand (5 bis 10 kΩ) bei hohen Frequenzen und einen großen Widerstand bei niedrigen Frequenzen aufweisen.
Sobald dieses RC-Glied zwischen Anode und Katode der Ausgangsröhre eingeschaltet wird, werden die Ströme der hohen Frequenzen vom Lautsprecher ferngehalten, so daß sich die Klangfarbe der übertragenen Signale verändert. Bei einem großen Widerstand des Klangfarbereglerkreises wird die Ausgangsröhre praktisch nicht geshuntet.
Das obenstehende Bild zeigt Prinzip und Stromlaufplan des NF-Verstärkers für unseren Empfänger. Dieser Verstärker hat bei einer Eingangsspannung von 0,1 bis 0,2 V eine Ausgangsleistung von 1 bis 3 W.
Der Gleichrichter liefert 2 Gleichspannungen — 230 V und 220 V. Die größere Spannung wird vor dem Siebwiderstand

abgenommen und an die Anode der Ausgangsröhre geführt. Das geschieht, damit der Anodenstrom der Ausgangsröhre nicht durch den genannten Widerstand fließt und an ihm einen bedeutenden Spannungsabfall der Gleichspannung verursacht.
Beide Bauteile — Gleichrichter und Niederfrequenzverstärker — können sowohl in einem Geradeausempfänger als auch in einem Superhetempfänger eingesetzt werden. Mit Aufbau und Betrieb dieser Empfänger werden wir uns in den folgenden Abschnitten befassen.

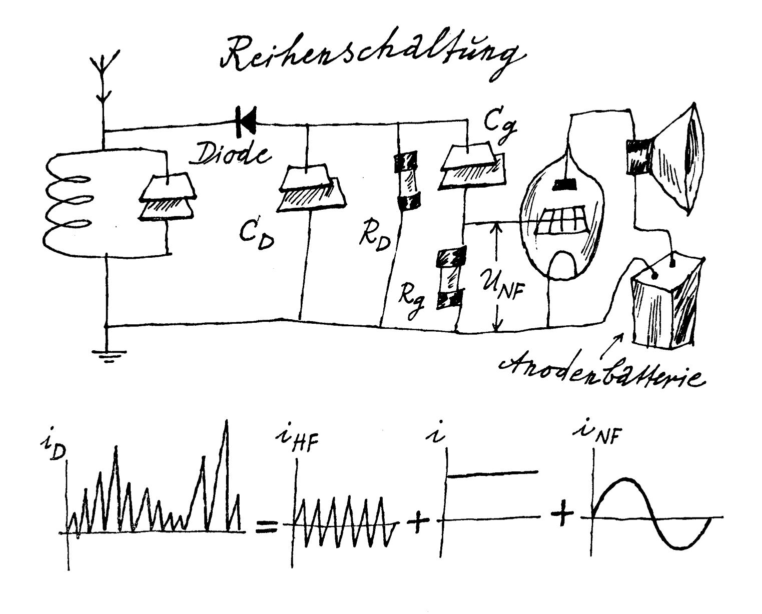
25. Wirkung der Diode im Verstärker

Bereits im ersten Teil dieser drei Broschüren haben wir uns mit der Diode beschäftigt. Obwohl wir ihre Wirkungsweise dort nur allgemein untersuchten, wurde doch die Ventilwirkung eingehend erläutert. Wir stellten fest, daß sie den modulierten Hochfrequenzwechselstrom in pulsierenden Strom umformt. Wir wissen auch, daß man jeden pulsierenden Strom in eine Wechselstromkomponente und in eine Gleichstromkomponente zerlegen kann. Diese Operation kann man auch im Detektorkreis mit Hilfe eines Siebglieds durchführen, das aus einem Kondensator C_D und R_D (R_D ist die Diodenbelastung) besteht.

In einem Detektorempfänger bilden die Kopfhörer die Diodenbelastung. Werden die Siebelemente richtig bemessen, so fließt die Wechselstromkomponente (die Hochfrequenzkomponente) über den Weg des geringsten Widerstands — durch den Kondensator C_D.

Nach unseren bisherigen Überlegungen müßte nun die Gleichstromkomponente des pulsierenden Stroms durch den Widerstand R_D fließen. In der Praxis ist das aber nicht ganz so. Der Diode wird ein moduliertes Signal zugeführt, so daß sich die Stromimpulse im Diodenstromkreis ununterbrochen verändern. Als Folge davon verändert sich auch der Strom, der durch den Widerstand R_D fließt, im Rhythmus der Modulation und bildet selbst einen pulsierenden Strom, den wir wiederum in eine Wechselstromkomponente (Niederfrequenzkomponente) und eine Gleichstromkomponente zerlegen können.

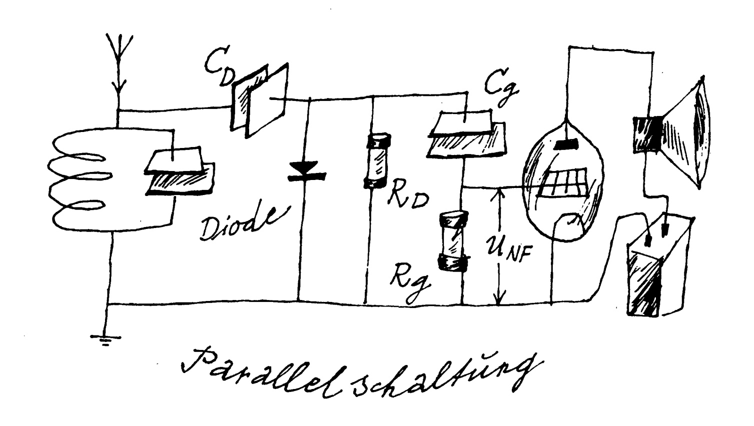
Um nun die Niederfrequenzkomponente aus dem Siebglied auszusieben, schaltet man noch einen Stromkreis ein, der aus



dem Kondensator C_S und der Diodenbelastung R_D besteht. Dieser Stromkreis sperrt den Gleichstrom, setzt der Hochfrequenzkomponente einen großen Widerstand entgegen und läßt die Niederfrequenz leicht durch.

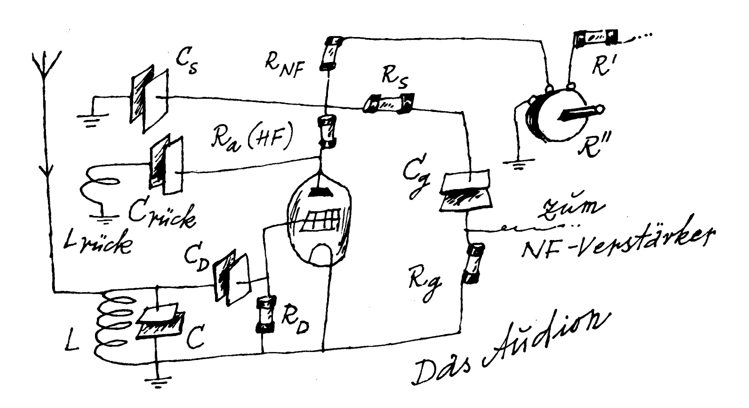
Auf diese Weise zerlegen wir den pulsierenden Strom, der durch die Demodulation entsteht, in 3 Komponenten: *die Gleichstromkomponente, die Hochfrequenzkomponente* und *die Niederfrequenzkomponente.* Die Niederfrequenz ist praktisch das Signal, das im Verlauf der Demodulation gewonnen werden muß.

Das Bild auf Seite 55 zeigt eine Diodenschaltung für einen Empfänger, in dem der von uns bereits früher gebaute NF-Verstärker arbeitet. Der Widerstand R'' (Lautstärkeregler) dient als Diodenbelastung, der Kondensator C_S und der Gitterableitwiderstand R_S der ersten Verstärkerröhre bilden den Siebkreis, der die Niederfrequenzkomponente von der



Gleichstromkomponente des demodulierten Signals trennt (R_S/C_S-Glied). Die NF-Komponente, die durch dieses Glied fließt, erzeugt am Widerstand R_{NF} eine NF-Spannung, die zwischen Steuergitter und Katode der ersten Verstärkerröhre anliegt.

Zu jeder Verstärkerstufe gehört eine Eingangskapazität C_e, die sich aus der Kapazität der Eingangsleitungen und der Verdrahtung zusammensetzt. Damit nun die HF-Komponente nicht über die Eingangskapazität in den Ein-

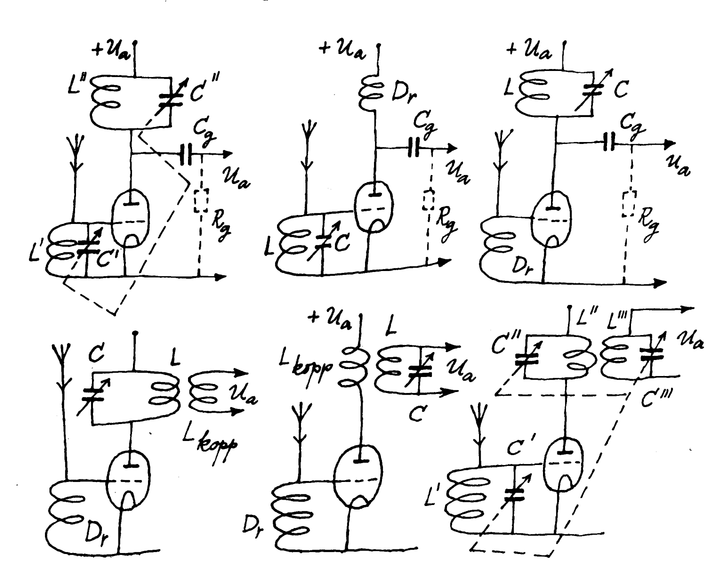


gangskreis des NF-Verstärkers fließt (das kann dazu führen, daß der Verstärker sich selbst erregt), wird in die Diodenstufe ein zusätzlicher Widerstand R_D eingeschaltet. Dieser Widerstand sperrt den Weg der Hochfrequenzkomponente, so daß sie nur durch den Kondensator C_D fließen kann. In der Regel beträgt der Widerstandswert von R_D' 10 bis 20 % der Diodenbelastung.
Von allen Komponenten des demodulierten Signals benötigen wir nur die Niederfrequenz. Die beiden anderen Komponenten (die Gleichstromkomponente und die Hochfrequenzkomponente) haben für uns keine Bedeutung. In einzelnen Fällen aber kann man sie dazu benutzen, den Betrieb des Empfängers zu verbessern. In unserem Empfänger arbeitet eine Germanium-Spitzendiode. Mit dem gleichen Erfolg können wir statt ihrer auch eine Röhrendiode einsetzen.
An dieser Stelle ist es angebracht, darauf hinzuweisen, daß es 2 Grundschaltungen für Detektorstufen gibt — die *Parallelschaltung* und die *Reihenschaltung*. Bei der 1. Schaltungsart sind Schwingkreis, Diode und Diodenbelastung parallelgeschaltet, bei der 2. Schaltungsart in Reihe. Die Reihenschaltung hat mehrere Vorteile (die Diode shuntet den Schwingkreis nur unbedeutend), und man ist bestrebt, möglichst sie anzuwenden.
In industriell gefertigten Rundfunkempfängern werden nur sehr selten spezielle Röhren als Dioden verwendet. Die erforderliche Diode ist meist in einer der Verstärkerröhren (in kombinierten Röhren) bereits vorhanden, z. B. in einer Pentode, genauer in einer Diode-Pentode. Weitere Einzelheiten hierzu in Abschnitt 33, „Bau eines Transistortaschensupers“.

26. Der Hochfrequenzverstärker

Das zu verstärkende Signal gelangt in der Regel direkt vom Eingangsschwingkreis an den Eingang der ersten HF-Verstärkerstufe. Der Eingangsschwingkreis ist auf eine bestimmte Weise mit der Antenne verbunden. Als Anodenbelastung in HF-Verstärkern verwendet man zweckmäßig einen auf die Frequenz der zu empfangenden Rundfunkstationen abgestimmten Schwingkreis. Wir erinnern uns daran, daß *die Trennschärfe eines Empfängers um so größer ist, je mehr abgestimmte Schwingkreise vorhanden sind.*

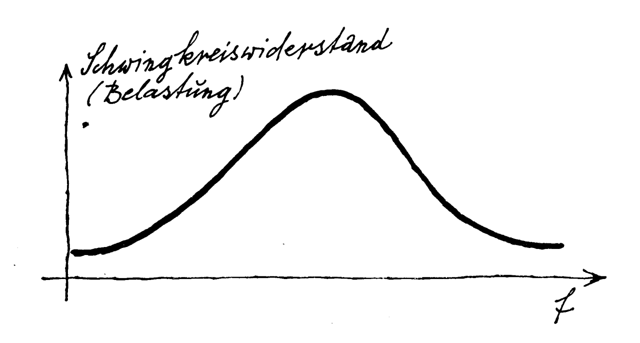
Daß man einen Schwingkreis als Anodenbelastung verwenden kann, ist deshalb möglich, weil der Schwingkreis, der in den



Anodenkreis eingeschaltet wird, sich im Resonanzfall wie ein ohmscher Widerstand verhält. Der Schwingkreiswiderstand erreicht in der Regel Werte von 10 bis 100 kΩ.
Vereinfacht läßt sich das so erklären, daß der Schwingkreis aus 2 Widerständen X_L und X_C besteht, die parallelgeschaltet sind.
Wir wissen aus den vorangegangenen Betrachtungen, daß sowohl der induktive Widerstand X_L als auch der kapazitive Widerstand X_C frequenzabhängig sind. Mit zunehmender Frequenz steigt der induktive Widerstand X_L und nimmt der kapazitive Widerstand X_C ab. Auf niedrigen Frequenzen, genauer auf Frequenzen, die unter der Resonanzfrequenz liegen, ist X_L im Verhältnis zu X_C kleiner. Der Gesamtwiderstand wird dadurch natürlich auch klein (die Spule shuntet den Kondensator). Auf Frequenzen, die höher liegen als die Resonanzfrequenz, bleibt der Gesamtwiderstand des Schwingkreises ebenfalls klein, da der kapazitive Widerstand X_C des Kondensators abnimmt (der Kondensator shuntet die Spule). Nur auf der Resonanzfrequenz, bei gleichen X_L und X_C, ist der Gesamtwiderstand des Schwingkreises ebenfalls groß. Man bezeichnet diesen Widerstand des Schwingkreises als Resonanzwiderstand und symbolisiert ihn durch die Buchstaben R_{res}. Genauso wie die Schwingkreisgüte mit zunehmenden Verlusten im Schwingkreis abnimmt, wird der Resonanzwiderstand R_{res} ebenfalls geringer. Auch hängt R_{res} genauso wie die Schwingkreisgüte von dem Verhältnis zwischen L und C des Schwingkreises ab.

$$R_{res} = \frac{L}{C \cdot R};$$

R_{res} — Resonanzwiderstand, L — Schwingkreisinduktivität, C — Schwingkreiskapazität, R — Ohmscher Widerstand des Schwingkreises.
Aus der Formel folgt, daß wir, wollen wir den Belastungswiderstand des HF-Verstärkers erhöhen, die Verluste im Schwingkreis herabsetzen und nach Möglichkeit Schwing-



kreise verwenden müssen, die eine große Induktivität, aber eine kleine Kapazität aufweisen.
Prinzipiell unterscheidet sich ein *Hochfrequenzverstärker* nicht von einem beliebigen anderen Verstärker. Trotzdem zeichnet er sich durch mehrere Besonderheiten aus, die wir unbedingt berücksichtigen müssen.
In erster Linie arbeiten in HF-Verstärkern gewöhnlich Spezialröhren — Hochfrequenzpentoden. Die wesentlichsten Vorteile dieser Röhren sind der große innere Widerstand (100 und 1000 kΩ) sowie die kleine Elektrodenkapazität C_{ag} zwischen Anode und Steuergitter.
Es wurde bereits beschrieben, wie die Elektrodenkapazität C_{ag} in der Röhre zustande kommt. Je höher nun die Frequenz des zu verstärkenden Signals ist, um so leichter gelangt das Signal aus dem Anodenkreis in den Steuergitterkreis. Die Anodengitterkapazität C_{ag} muß also unter diesen Umständen sehr klein sein, damit sie den Hochfrequenzströmen einen ausreichend großen Widerstand entgegensetzen kann.
Das ist der Grund, warum man in HF-Verstärkern spezielle Pentoden einsetzt und warum deren Anodengitterkapazität Cag einige tausendstel Pikofarad nicht übersteigt.
Die Rückkopplung entsteht nicht nur durch die Elektrodenkapazität in der Röhre, sondern auch durch die Kapazitäten der Röhrenanschlüsse an der Röhrenfassung, durch die Kapa-

zitäten zwischen den Bauelementen und den Leitungen des Anoden- und des Gitterkreises. Aus diesem Grund kommt es bei HF-Verstärkern auf eine äußerst sorgfältige Montage an, um damit die Kopplung zwischen Anodenkreis und Gitterkreis möglichst kleinzuhalten. Auch die richtige Auswahl der Röhren für den HF-Verstärker spielt eine große Rolle.
Eine weitere Besonderheit der Hochfrequenzpentoden besteht in ihrem großen inneren Widerstand. Der innere Widerstand einer Röhre ist für solche Verstärkerstufen bedeutungsvoll, in denen ein Schwingkreis als Anodenbelastung arbeitet.
Weshalb wohl?
Der Schwingkreis und die Röhre sind parallelgeschaltet — ein Anschluß des Schwingkreises ist mit der Anode der Röhre, der andere Anschluß mit der Katode verbunden (über den Siebkondensator im Gleichrichter). Wir können die Röhre also praktisch als einen Widerstand ansehen, der parallel zum Schwingkreis liegt und shuntet. Je größer nun der innere Widerstand der Röhre ist, desto schwächer shuntet die Röhre den Schwingkreis und desto größer wird die Schwingkreisgüte sein.
Um den Anodenschwingkreis auf den gewünschten Sender abzustimmen, schalten wir, genau wie bei der Abstimmung des Eingangsschwingkreises, verschiedene Schwingkreisspulen ein (Umschaltung von einem Wellenbereich auf einen anderen) und verändern die Schwingkreiskapazität mit dem Drehkondensator (kontinuierliche Durchstimmung des geschalteten Frequenzbereichs). Sind nun im Empfänger 2 Schwingkreise vorhanden, so müssen beide gleichzeitig abgestimmt werden. Wir benötigen dazu 2 gleiche Spulensätze, 2 Umschalter (oder einen kombinierten Umschalter) und 2 Abstimmkondensatoren (bzw. einen Drehkondensatorblock).

27. Die Rückkopplung

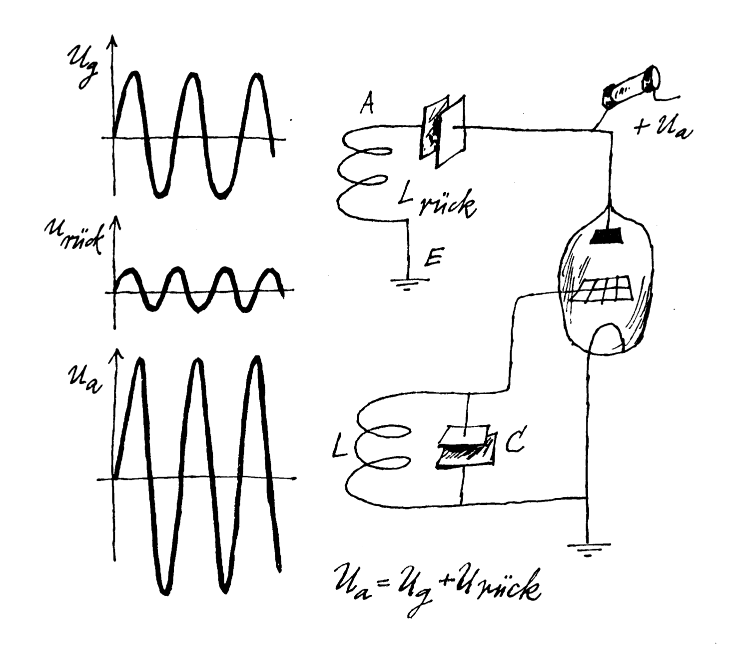
Bereits mehrmals ist in den bisherigen Ausführungen der Begriff *Rückkopplung* gefallen. Wir wollen sie näher untersuchen.

Die Gitterspannung steuert den Anodenstrom und beeinflußt auf diese Weise die Anodenspannung. Mit anderen Worten: Der Steuergitterkreis ist über den Elektronenstrom in der Röhre mit dem Anodenkreis verbunden. Das heißt, es besteht eine normale direkte Kopplung zwischen Steuergitter und Anode, die die Basis für die Verstärkungseigenschaften der Röhre bildet.

In einer Verstärkerstufe kann aber auch eine Rückkopplung entstehen, d. h. eine Rückwirkung der Anode auf das Steuergitter, die unerwünscht ist (z. B. über die Stromquellen, die Elektrodenkapazitäten der Röhre oder durch die dichte Anordnung des Anoden- und des Gitterkreises). Diese Rückwirkung kann sich auf den Betrieb des Empfängers oder des Verstärkers negativ auswirken.

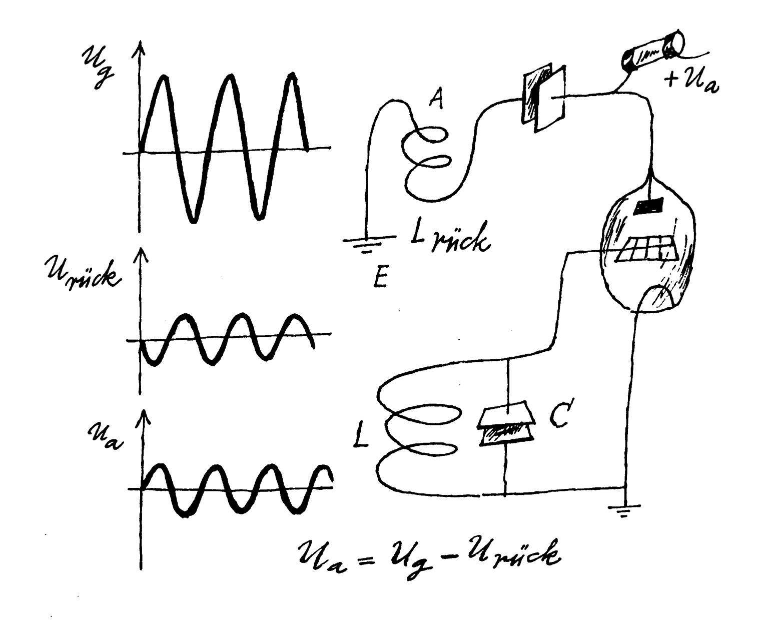
Es gibt allerdings auch Fälle, wo wir in einer Verstärkerstufe eine Rückkopplung bewußt erzeugen, um dadurch eine bessere Wirkungsweise der jeweiligen Stufe zu erreichen (z. B. um die Verzerrungen in einem NF-Verstärker herabzusetzen oder um die Trennschärfe eines HF-Verstärkers zu erhöhen).

Der Einfluß der Rückkopplung auf die Wirkungsweise einer Verstärkerstufe hängt in erster Linie davon ab, wie die Gitterspannung, die aus dem Anodenkreis eingespeist wird (die rückgekoppelte Spannung $U_{rück}$) mit dem zu verstärkenden Signal U_g, das an das Gitter der vorangehenden Stufe gelangt, zusammenwirkt.

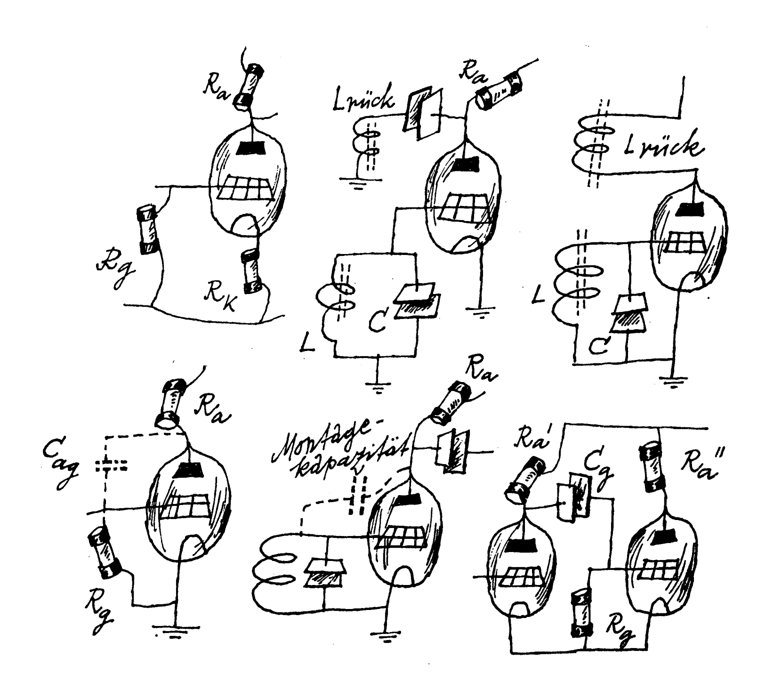


Wirken diese beiden Spannungen im „Gleichschritt“, d. h., erscheinen die positiven Halbwellen und die negativen Halbwellen gleichzeitig, so spricht man von einer *Mitkopplung*. Tritt aber der entgegengesetzte Fall ein, das heißt, wirkt die rückgekoppelte Spannung der Signalspannung entgegen, so nennt man das eine *Gegenkopplung*. Es ist völlig klar, daß die Mitkopplung die Gitterwechselspannung erhöht, die Gegenkopplung dagegen dazu beiträgt, die Gitterwechselspannung zu vermindern.

Sehr bedeutsam ist auch der Grad der Rückkopplung. Er bestimmt, in welchem Umfang Energie aus dem Anodenkreis in den Gitterkreis zurückgekoppelt wird. Je fester die Rückkopplung, desto größer (bei Mitkopplung) oder desto kleiner (bei Gegenkopplung) die resultierende Spannung am Steuergitter.



Es gibt verschiedene Rückkopplungsschaltungen. Einige von ihnen zeigt (vereinfacht) das Bild auf Seite 64. Die Rückkopplungsspannung wird am Katodenwiderstand R_k von der Wechselstromkomponente des Anodenstroms erzeugt, wenn sie durch R_k fließt. Bei dieser Schaltung entsteht immer eine negative Rückkopplung. Je größer der Katodenwiderstand R_k, desto größer auch die Rückkopplungsspannung oder, anders gesagt, um so fester die Rückkopplung.
In der anderen Schaltung bilden Gitterableitwiderstand R_g und Kapazität C_{ag} (das kann die Elektrodenkapazität oder ein spezieller Kondensator sein) einen Spannungsteiler, so daß ein Teil der Anodenwechselspannung am Gitterableitwiderstand R_g wirkt, d. h. zwischen Steuergitter und Katode. Das ist die Rückkopplungsspannung. Sie wird um so größer, je höher die Frequenz des zu verstärkenden Signals und je größer die Kapazität C_{ag} bzw. je kleiner der Widerstand des Spannungs-



teilers im oberen Bereich ist. In diesem Beispiel kann die Rückkopplung sowohl positiv als auch negativ sein. Es kann also sowohl Mitkopplung als auch Gegenkopplung vorliegen. Das hängt von mehreren Faktoren ab, darunter auch von der Frequenz des zu verstärkenden Signals.

In verschiedenen Schaltungen erfolgt die Rückkopplung mit einer Rückkopplungsspule $L_{rück}$, die nahe der Schwingkreisspule L angeordnet wird. Auf diese Weise läßt sich der Charakter der Rückkopplung leicht verändern (d. h. eine positive oder eine negative Rückkopplung einstellen). Man wechselt die Anschlüsse der Rückkopplungsspule (oder der Schwingkreisspule L), bzw. man dreht eine der beiden Spulen um 180°. Der Kopplungsgrad hängt in diesem Fall von dem Windungszahlverhältnis beider Spulen und dem Abstand zwischen

ihnen ab. Nähert man beide Spulen, so wird die Rückkopplung fester.

Die Rückkopplung kann mehrere Stufen zugleich erfassen. In NF-Verstärkern z. B. entsteht sehr häufig eine Rückkopplung zwischen dem Anodenkreis der Ausgangsstufe und dem Steuergitterkreis der 1. Stufe.

28. Der Superhetempfänger

In den vorangegangenen Abschnitten haben wir uns mit der Schaltung und dem Aufbau eines Geradeausempfängers vertraut gemacht. Dabei wurde deutlich, daß dieser Empfänger eine Reihe ernster Mängel aufweist. Einer dieser Mängel besteht darin, daß die Trennschärfe bei zunehmender Frequenz abnimmt.

Wenn z. B. ein Empfänger mit 2 Schwingkreisen bei einer mittleren Schwingkreisgüte (Q = 100) das Störsignal im Langwellenbereich um 10- bis 30mal schwächer wiedergibt als das Nutzsignal, so unterdrückt derselbe Empfänger das Störsignal im Mittelwellenbereich nur noch 1,5- bis 3mal.

Was den Kurzwellenbereich anbetrifft, so weist ein Geradeausempfänger in diesen Fall praktisch gar keine Trennschärfe mehr auf. Daß es mit zunehmender Frequenz immer schwieriger wird, 2 benachbarte Rundfunksender (Frequenzabstand 9 kHz) voneinander zu trennen, erklärt sich daraus, daß der Frequenzabstand im Verhältnis zur Resonanzkurve ständig abnimmt.

Im Langenwellenbereich (150 bis 420 kHz) ist ein Frequenzabstand von 9 kHz noch sehr groß. Die Frequenzen der benachbarten Rundfunksender unterscheiden sich noch um 2 bis 7 % voneinander.

Im Mittelwellenbereich (520 bis 1600 kHz) sieht das schon wesentlich anders aus. Hier unterscheiden sich die benachbarten Frequenzen unter den gleichen obengenannten Bedingungen nur noch um 0,7 bis 2 %.

Im Kurzwellenbereich beträgt der Störabstand im Verhältnis zu den Frequenzen benachbarter Rundfunksender (Frequenzabstand 9 kHz) insgesamt nur noch 0,08 bis 0,2 %.

Der Geradeausempfänger hat darüber hinaus einen weiteren Mangel: Im Mittelwellenbereich, besonders aber im Kurzwellenbereich, erreicht man keine hohe Empfindlichkeit mehr. Der Grund dafür besteht darin, daß mit zunehmender Frequenz auch die unerwünschten Rückkopplungen größer werden. Bei höheren Frequenzen verstärkt sich z. B. die Rückkopplung über die Elektrodenkapazität C_{ag} und die Kapazität zwischen dem Anodenkreis und dem Gitterkreis der HF-Verstärkerröhre immer mehr. Um zu verhindern, daß der HF-Verstärker selbst erregt wird, sind wir gezwungen, die Verstärkung herabzusetzen.

Mehrere Mängel eines Geradeausempfängers sind auch dadurch bedingt, daß man alle im Empfänger vorhandenen Schwingkreise abstimmen muß. Bei Änderung der Kapazität des Drehkondensators verändert sich automatisch auch die Schwingkreisgüte, so daß Empfindlichkeit und Trennschärfe des Empfängers im jeweiligen Wellenbereich stark schwanken. Setzt man nun in einem Geradeausempfänger mehrere Schwingkreise ein, um eine höhere Trennschärfe zu erreichen (je mehr Schwingkreise, desto höher die Trennschärfe), so benötigt man dazu einen komplizierten Drehkondensatorblock.

Der zuletzt genannte Mangel kann bei einem Geradeausempfänger mit Festabstimmung auf eine bestimmte Rundfunkstation beseitigt werden. Da in diesem Fall alle Schwingkreise stets auf die gleiche Frequenz abgestimmt sind, ist es auch möglich, Festkondensatoren zu verwenden. Stimmt man diesen Empfänger jetzt auch noch auf einen Sender mit einer verhältnismäßig niedrigen Frequenz ab, z. B. auf einen Sender im Langwellenbereich, so erhält man hohe Trennschärfe und Empfindlichkeit.

Durch eine einfache Zusatzeinrichtung können wir mit einem Geradeausempfänger mit Festabstimmung, ohne auf die genannten Vorteile zu verzichten, viele Sender im Lang-, Mittel- und Kurzwellenbereich empfangen. Diese Zusatzeinrichtung, die es ermöglicht, den Geradeausempfänger

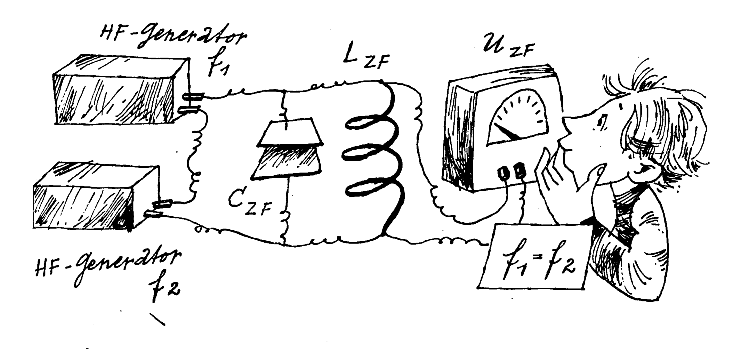
mit Festabstimmung in einen durchstimmbaren Allwellen-
empfänger zu verwandeln, bezeichnet man als *Frequenz-
wandler.* Ein Festfrequenzempfänger mit einem Frequenz-
wandler ist eine hochwertige Empfangsanlage, die wir auch
Superhetempfänger nennen.

29. Die Umwandlung der Frequenz beim Superhetempfänger

Bei den verschiedensten Funkgeräten spielen nichtlineare Vorgänge, zu denen die bereits bekannten Gittermodulation, Gleichrichtung von Wechselströmen und Signalverstärkung gehören, in dem Fall, da Amplitudenverzerrungen entstehen, eine große Rolle. Das wichtigste Merkmal jedes nichtlinearen Vorgangs ist die Formveränderung des elektrischen Signals, so daß das Signal neue Komponenten enthält. Wird z. B. bei der Demodulation und bei der Gleichrichtung von Wechselstrom die ursprüngliche Signalform stark verändert, dann verwandelt sich der Wechselstrom in pulsierenden Strom. Dabei erhält man die Möglichkeit, die Niederfrequenzkomponente (bei der Demodulation) oder die Gleichstromkomponente (bei der Gleichrichtung) auszusieben. Eine Formveränderung des Signals ergibt sich auch bei Amplitudenverzerrungen im NF-Verstärker. Die dabei entstehenden neuen Komponenten nehmen wir als zusätzliches Rauschen und Klirren wahr, die die Übertragung stören. Ein nichtlinearer Vorgang tritt also stets dann auf, wenn im Stromkreis ein Bauelement vorhanden ist, das die Signalform verändert (nichtlineares Bauelement), z. B. eine Halbleiterdiode, eine Röhrendiode, eine Elektronenröhre, ein Transistor usw.

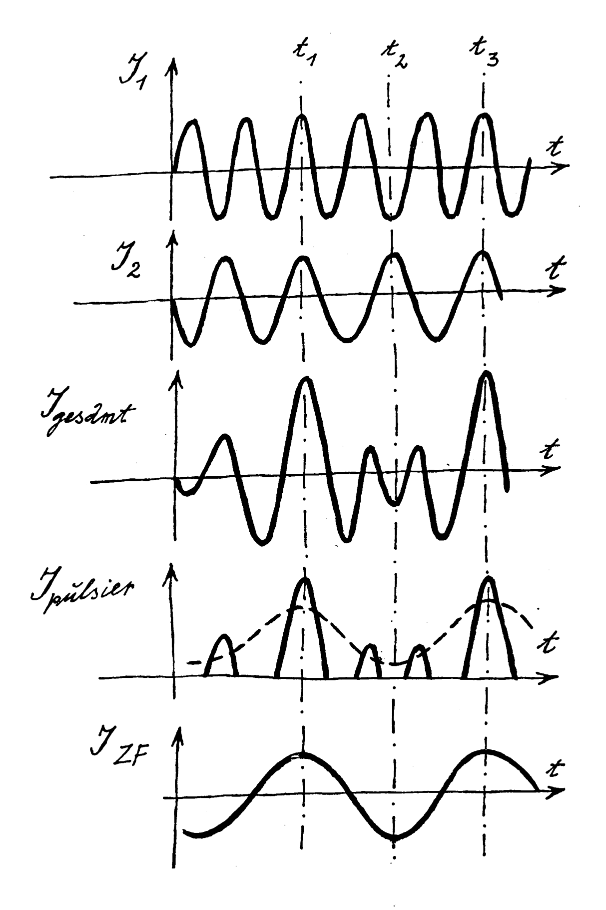
Zu den nichtlinearen Vorgängen gehört auch die Frequenzumwandlung, die die Grundlage für den Betrieb eines Superhetempfängers bildet.

Führen wir einem nichtlinearen Bauelement, etwa einer Halbleiterdiode oder einer Elektronenröhre, gleichzeitig 2 elektrische Signale mit unterschiedlichen Frequenzen zu, so entstehen im Stromkreis des jeweiligen Bauelements ver-

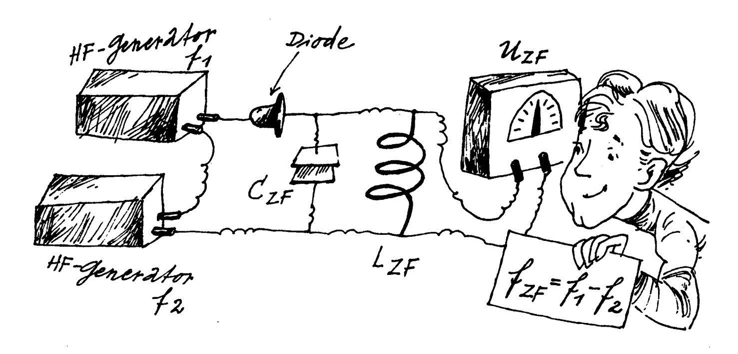


schiedene Komponenten jedes der zugeführten Signale. Unter diesen Komponenten finden wir auch eine Wechselstromkomponente der Differenzfrequenz, oder, wie man sie auch bezeichnet, der *Zwischenfrequenz*. Die Bezeichnung Zwischenfrequenz für diese Komponente wurde deshalb gewählt, weil ihre Frequenz zahlenmäßig der Differenz der Frequenzen beider zugeführten Signale entspricht. Führen wir beispielsweise einer Diode ein Signal mit der Frequenz $f_1 = 1800$ kHz und ein Signal mit der Frequenz $f_2 = 1300$ kHz zu, so entsteht im Diodenkreis eine Komponente mit der Differenzfrequenz (der Zwischenfrequenz) $f_{ZF} = f_1 — f_2 = 500$ kHz. Diese Frequenz mit einem Schwingkreis L_{ZF}/C_{ZF}, der auf 500 kHz abgestimmt ist, auszusieben, bereitet keine Schwierigkeiten.

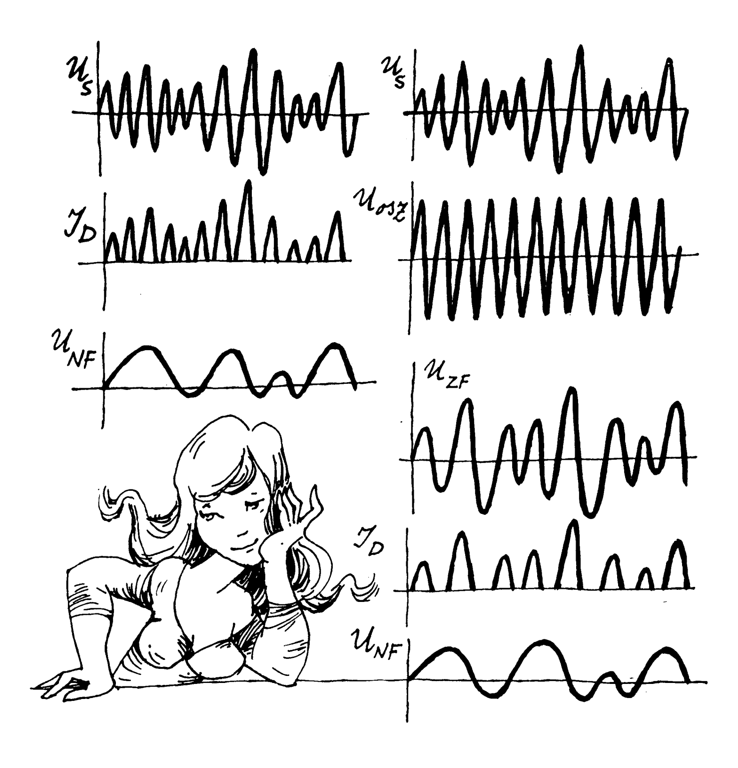
Wie das ZF-Signal zustande kommt, können wir mit Hilfe von Kennlinien erklären (s. Bild auf S. 71). Die im Stromkreis fließenden Ströme I_1 und I_2 mit den Frequenzen f_1 und f_2 addieren sich. Zu einen bestimmten Zeitpunkt (t_1) fließen beide Ströme in einer Richtung, so daß sich ihre Amplituden addieren. Die positive Stromamplitude mit der niedrigeren Frequenz wird nach und nach zurückbleiben, so daß der Zeitpunkt (t_2) eintritt, da beide Ströme in entgegengesetzten Richtungen fließen und die Amplitude des Gesamtstroms gleich der Differenz zwischen I_1 und I_2 ist. Das weitere Zurückbleiben des Stromes I_2 führt dazu, daß zum Zeitpunkt t_3



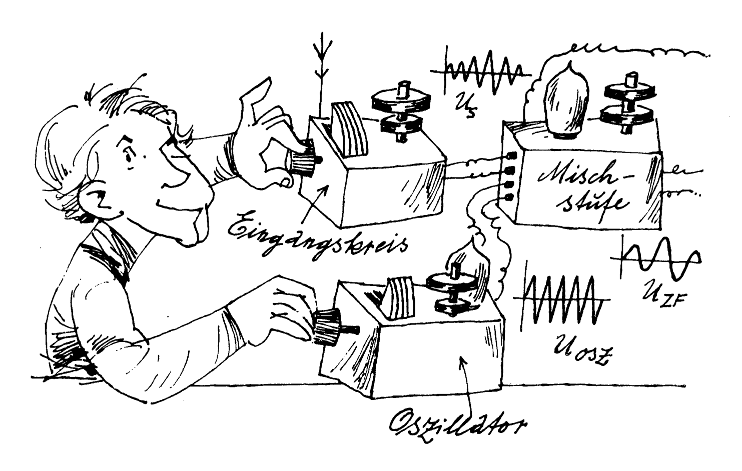
die Flußrichtung beider Ströme wieder übereinstimmt und der Gesamtstrom ansteigt. Auf diese Weise ändert sich die Amplitude des Gesamtstroms I_{gesamt} periodisch. Diese periodische Änderung erinnert an das Bild eines modulierten Signals. Die Änderungsfrequenz der Amplitude des Gesamtstroms ist gleich der Frequenzdifferenz der Ströme I_1 und I_2.
Das bisher Gesagte läßt sich sehr leicht an einem einfachen Beispiel beweisen. Wenn die Frequenz $f_1 = 10$ Hz und die



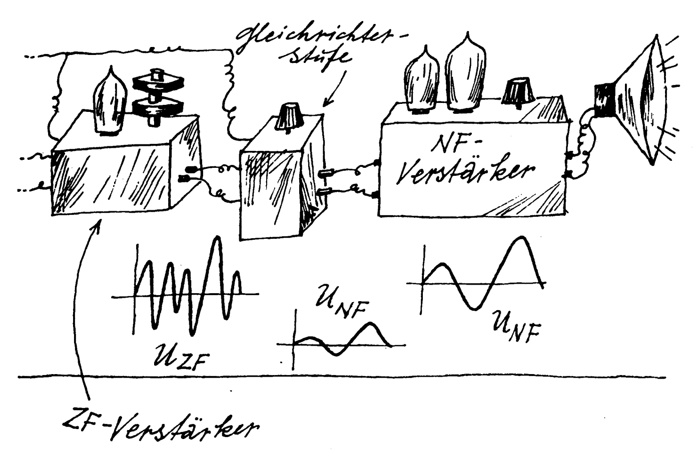
Frequenz $f_2 = 8$ Hz beträgt, so bleibt die zweite Schwingung während jeder Sekunde im Verhältnis zur ersten Schwingung um 2 volle Perioden zurück. Mit anderen Worten, während jeder Sekunde eilt die zweite Schwingung der ersten Schwingung um eine ganze Periode nach. Das bedeutet, in jeder Sekunde stimmten die Amplituden der Ströme I_1 und I_2 2mal überein, und die Amplitude des Gesamtstroms erreichte dabei ihren Maximalwert. Die Änderungsfrequenz der Amplitude des Gesamtstroms ist somit gleich 2 Hz, also gleich der Differenz 10 Hz — 8 Hz = 2 Hz.
Schaltet man nun in den Stromkreis, in dem der Gesamtstrom I_{gesamt} fließt, einen Detektor, so wird der Wechselstrom in pulsierenden Strom umgeformt, und wir können das Differenzsignal aussieben. Das geschieht ähnlich wie das Aussieben der Niederfrequenzkomponente aus dem demodulierten Signal. Das heißt also, ohne einen Detektor oder ein anderes nichtlineares Bauelement kann man das Zwischenfrequenzsignal nicht gewinnen. Das bedeutet nichts anderes, als daß sich ohne Detektor die Niederfrequenzkomponente nicht aus dem modulierten Signal aussieben läßt. Daraus erklärt sich, daß die Niederfrequenzkomponente, genau wie das Zwischenfrequenzsignal, nur durch eine Formveränderung des aufgenommenen Signals infolge nichtlinearer Vorgänge entsteht. Das Zwischenfrequenzsignal enthält alle Veränderungen der beiden Ausgangssignale. Ist z. B. eines der Signale moduliert,



so erweist sich das Zwischenfrequenzsignal auch als moduliert. Mit Hilfe der Frequenzumwandlung läßt sich nun ein Superhetempfänger gemäß den Blockschaltbildern auf Seite 74 aufbauen. In diesem Empfänger leitet man die Signalspannung U_S mit der Frequenz f_S des gewünschten Senders unmittelbar an den Frequenzwandler (die Mischstufe). Im einfachsten Fall können wir dazu eine Halbleiter-Spitzendiode verwenden. Gleichzeitig wird der Mischstufe ein zweites hochfrequentes Signal U_{OSZ} mit der Frequenz f_{OSZ} zugeführt. Dieses Signal erzeugt ein spezieller Generator, der sogenannte *Oszillator*. Infolge der nichtlinearen Vorgänge in der Mischstufe entsteht das Zwischenfrequenzsignal U_{ZF} mit der



Frequenz f_{ZF}, die gleich der Differenz zwischen Oszillatorfrequenz f_{osz} und Signalfrequenz f_s ist. Ein Schwingkreis (L_{ZF}/C_{FZ}) siebt das Zwischenfrequenzsignal aus. Anschließend gelangt das ZF-Signal an den ZF-Verstärker.
Dieser unterscheidet sich in keiner Weise von einem auf eine Festfrequenz abgestimmten Geradeausempfänger. Die Festabstimmung gestattet es, im ZF-Verstärker relativ leicht



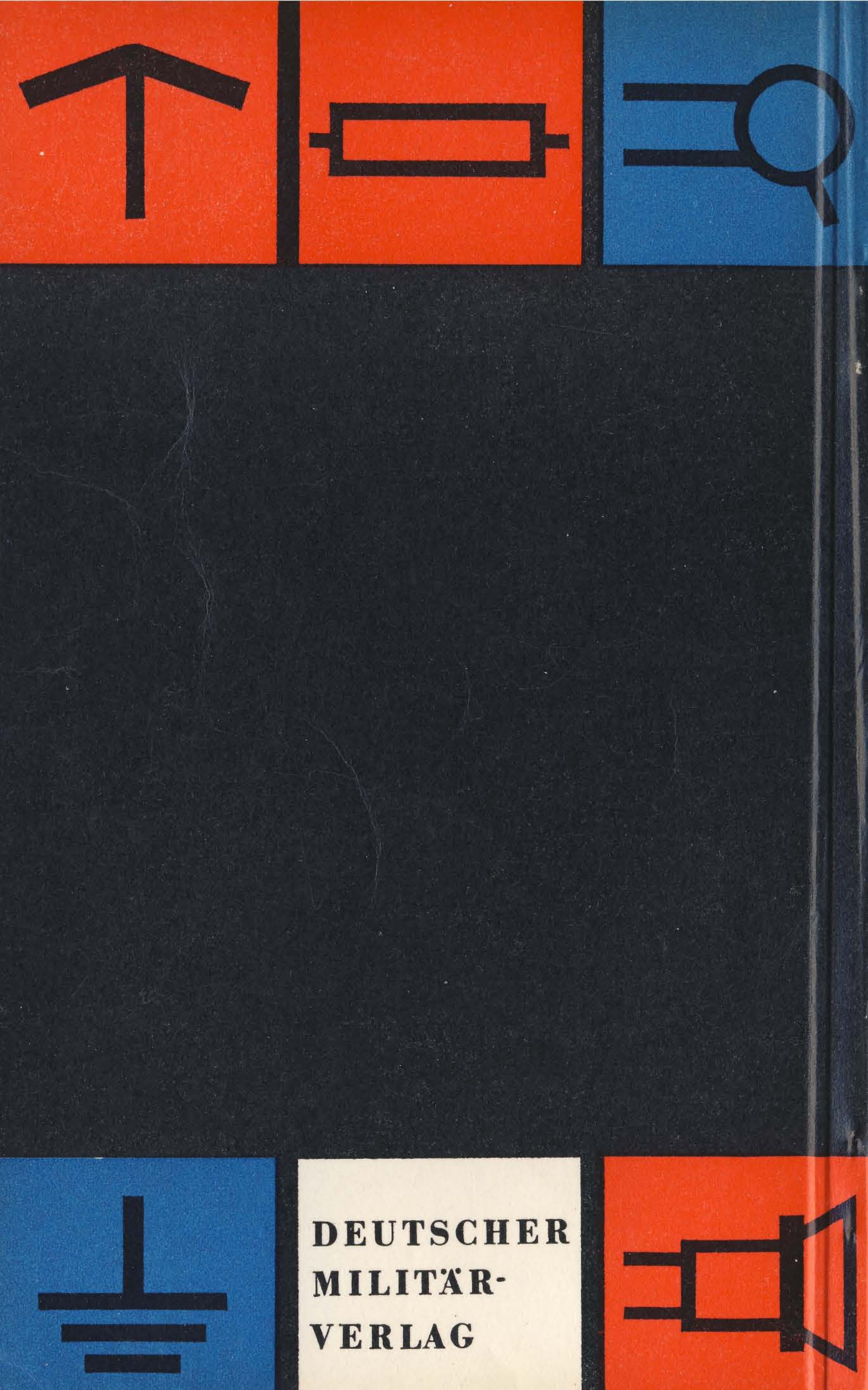
mehrere Schwingkreise (gewöhnlich 3 bis 6) einzusetzen. Nach der Verstärkung des Zwischenfrequenzsignals (U_{ZF}) leitet man dieses einem gewöhnlichen Detektor zu. Das auf diese Weise gewonnene Niederfrequenzsignal unterscheidet sich nicht von der Niederfrequenzkomponente, die man nach der Demodulation des von der Antenne aufgenommenen Signals erhält.
Vergleichen wir jetzt einmal beide Empfänger: Im Geradeausempfänger wurde das ankommende Signal unmittelbar verstärkt und demoduliert. Im Superhetempfänger dagegen wandeln wir das aufgenommene Signal (U_S) zuerst in das Zwischenfrequenzsignal um, verstärken dieses und demodulieren es dann anschließend. Die Mischstufe mit dem Oszillator gestaltet die Empfängerschaltung komplizierter. Ist diese Komplizierung der Empfängerschaltung gerechtfertigt?
Diese Frage läßt sich erst dann beantworten, wenn wir uns mit dem Aufbau und der Wirkungsweise eines Superhetempfängers sowie mit seinen Vor- und Nachteilen beschäftigt haben.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis
Teil I — Der junge Funker · Band 10

Inhaltsverzeichnis
Teil III — Der junge Funker · Band 12

1. — 10 Tausend
Deutscher Militärverlag · Berlin 1968
Lizenz-Nr. 5
Lektor: Sonja Topolov
Illustrationen: Heinz Bormann
Korrektor: Ingeborg Klein
Typografie: Dieter Lebek · Hersteller: Wolfgang Guthmann
Gesamtherstellung: Druckerei Volksstimme Magdeburg
1,90


DEUTSCHER
MILITÄR-
VERLAG